



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

KOMPENZACE MĚŘENÍ REPRODUKTORŮ NA STANDARDNÍ OZVUČNICI - PŘEPÁŽCE

COMPENSATION OF LOUDSPEAKER MEASUREMENTS USING STANDARD BAFFLE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Štěpáník

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Miroslav Balík, Ph.D.

BRNO 2022

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Audio inženýrství**
specializace Zvuková produkce a nahrávání
Ústav telekomunikací

Student: Jiří Štěpáník

ID: 212631

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Kompenzace měření reproduktorů na standardní ozvučnici - přepážce

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte příslušnou normu, která popisuje tzv. standardní ozvučnici a seznámte se s modulární standardní ozvučnicí - přepážkou. Nastudujte různé typy měření vlastností reproduktorů, které se se standardní ozvučnicí - přepážkou provádějí. Proveďte sadu srovnávacích měření kmitočtových charakteristik reproduktorů dostupných ve výměnných vsadkách standardní ozvučnice přepážky. Dokumentujte zkresení průběhů charakteristik měřených reproduktorů, které jsou dané samotnou standardní ozvučnicí a případnými podmínkami měření. Nastudujte postupy kompenzace těchto zkresení a realizujte softwarovou kompenzaci, která zajistí potlačení tohoto zkresení. Závěrem proveďte ověřovací měření charakteristik k posouzení úspěšnosti kompenzace.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] ČSN EN 60268-5: Elektroakustická zařízení – Část 5: Reprodukory. Česká technická norma, Český normalizační institut, únor 2004.
- [2] Y. Le, et al., "A Diffractive Study on the Relation between Finite Baffle and Loudspeaker Measurement," J. of Audio Eng. Soc., Volume 59, Issue 12, pp. 944-952, December 2011.

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 31.5.2022

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Balík, Ph.D.

doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Kmitočtová charakteristika reproduktoru je jeden ze stěžejních údajů, který je potřeba znát např. při návrhu reproduktorové ozvučnice nebo reproduktorové soustavy. Kmitočtová charakteristika by měla dosahovat co nejvyšší přesnosti s minimem zkreslení. Jak takovéto charakteristiky dosáhnout popisuje norma ČSN EN 60268-5, která uvádí jako jeden ze způsobů použití standardních ozvučnic. Kromě standardní ozvučnice–přepážky mají tyto ozvučnice v normě uvedené korekční křivky pro měřené charakteristiky. To ovšem neznamená, že standardní ozvučnice–přepážka měření nezkrsluje. Cílem této práce je analýza zkreslení měření způsobených touto ozvučnicí a dalšími elementy a jejich kompenzace. Práce obsahuje popis určitých částí normy ČSN EN 60268-5 se zaměřením na standardní ozvučnici–přepážku. Zejména na její konstrukci a způsoby měření reproduktorů na ní namontovaných. V rámci práce bylo provedeno několik testovacích měření. Tato měření byla provedena v bezdrazové komoře s reproduktory namontovaným na modulární standardní ozvučnici–přepážce, což je modifikace standardní ozvučnice–přepážky, která je v práci taktéž popsána. Mezi provedená měření patří měření kmitočtových charakteristik v různých vzdálenostech mikrofonu od reproduktoru při různých polohách ozvučnice v bezdrazové komoře. Z testovacích měření vyplývá, že modulární standardní ozvučnice–přepážka i bezdrazová komora způsobují zkreslení měření. V rámci dalších měření je minimalizováno zkreslení bezdrazovou komorou a také zcela odstraněno zkreslení způsobené podstavou modulární standardní ozvučnice–přepážky. V práci je následně uvedena teorie difrakcí zvuku na hranách standardní ozvučnice–přepážky a teorie rozšířené Biot-Tolstoy-Medwinovy metody modelování těchto difrakcí pomocí numerických výpočtů. Na základě těchto poznatků byla provedena v prostředí Matlab softwarová kompenzace zkreslení difrakcemi. Z výsledků kompenzace není zcela jisté, v jakém rozsahu se dá považovat za úspěšnou. Dá se spekulovat o tom, že funguje pouze na určitých kmitočtech. Je nutné ověřit funkčnost této metody kompenzace dalším testovacím měřením.

KLÍČOVÁ SLOVA

Difrakce, kompenzace, měření, ozvučnice, přepážka, reproduktor

ABSTRACT

The frequency response of the loudspeaker is one of the key data that needs to be known, for example, when designing a speaker cabinet or speaker system. The frequency response should be achieved with the highest possible accuracy and with a minimum of distortion. How to achieve such characteristics is described in the standard ČSN EN 60268-5, which states as one of the ways the use of standard enclosures. Except for the standard baffle, these baffles have correction curves for the measured characteristics described in the standard. However, this does not mean that the standard baffle does not distort the measurement. The aim of this work is to analyze the distortion of measurements caused by this baffle and other elements and their compensation. The work contains a description of certain parts of the standard ČSN EN 60268-5 with focus on the standard baffle. Especially on its construction and methods of measuring the speakers mounted on it. Several test measurements were performed within the work. These measurements were performed in an anechoic chamber with speakers mounted on a modular standard baffle, which is a modification of the standard baffle which is also described in the work. The measurements performed include the measurement of frequency characteristics at different distances of the microphone from the speaker at different positions of the baffle in the anechoic chamber. The test measurements show that the modular standard baffle and anechoic chamber cause measurement distortion. In other measurements, the distortion by the anechoic chamber is minimized and the distortion caused by the base of the modular standard baffle is completely eliminated. The thesis then presents the theory of sound diffraction at the edges of a standard baffle and the theory of the extended Biot-Tolstoy-Medwin method of modeling these diffractions using numerical calculations. Based on this theory, software compensation of diffraction distortion was performed in Matlab. It is not entirely clear from the results of the compensation to what extent it can be considered successful. It can be speculated that it only works on certain frequencies. It is necessary to verify the functionality of this compensation method by another test measurement.

KEYWORDS

Baffle, compensation, diffraction, enclosure, measurement, speaker

ŠTĚPÁNÍK, Jiří. *Kompenzace měření reproduktorů na standardní ozvučnici - přepážce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2022, 59 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Miroslav Balík, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Jiří Štěpáník
VUT ID autora: 212631
Typ práce: Bakalářská práce
Akademický rok: 2021/22
Téma závěrečné práce: Kompenzace měření reproduktorů na standardní ozvučnici - přepážce

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Miroslavu Balíkovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace a podnětné návrhy k práci.

Dále bych rád poděkoval rodině a přátelům za podporu v průběhu práce.

Obsah

Úvod	12
1 Ozvučnice dle normy ČSN EN 60268-5	13
1.1 Standardní ozvučnice - přepážka	13
1.2 Standardní ozvučnice - skříň	14
1.2.1 Standardní měřicí ozvučnice typu A	14
1.2.2 Standardní měřicí ozvučnice typu B	15
2 Měření dle normy ČSN EN 60268-5	16
2.1 Podmínky měření dle ČSN EN 60268-5	16
2.1.1 Montáž reproduktorů dle ČSN EN 60268-5	16
2.2 Měření dle ČSN EN 60268-5 proveditelná na ozvučnicích dle této normy	17
2.2.1 Měření kmitočtové charakteristiky dle ČSN EN 60268-5	17
3 Konstrukční uspořádání standardní ozvučnice-přepážky	20
3.1 Konstrukční uspořádání modulárního řešení standardní ozvučnice- přepážky	22
4 Výsledky testovacích měření	24
4.1 Měření kmitočtové charakteristiky ve vzdálenosti 1 m - 1. část	24
4.2 Měření kmitočtové charakteristiky v blízkém poli	26
4.3 Měření kmitočtové charakteristiky ve vzdálenosti 1 m - 2. část	30
5 Kompenzace vlivů podstavy	32
6 Kompenzace vlivů difrakcí	34
6.1 Teorie rozšířené Biot-Tolstoy-Medwinovy metody	34
6.2 Difrakce vznikající na standardní ozvučnici - přepážce	37
6.3 Softwarová kompenzace vlivů difrakcí	38
Závěr	44
Literatura	45
Seznam symbolů a zkratk	46
Seznam příloh	50

A	Definice měřících poloh	51
A.1	Měřicí poloha - konfigurace 1	51
A.2	Měřicí polohy v konfiguracích 2 a 3	52
B	Různé polohy měření ve vzdálenosti 1 m	54
C	Tlumení odrazů zvuku od podstavy	56
D	Obsah elektronické přílohy	58

Seznam obrázků

1.1	Vznik akustického zkratu. Převzato z knihy [2].	13
1.2	Nákres standardní ozvučnice-přepážky. Převzato z normy [1].	14
1.3	Nákres standardní měřicí ozvučnice typu A. Převzato z normy [1]. . .	15
1.4	Nákres standardní měřicí ozvučnice typu B. Převzato z normy [1]. . .	15
2.1	Korekční křivka pro standardní ozvučnici typu A, průměry reproduktorů = 30 cm, 38 cm, 46 cm. Převzato z normy [1].	19
2.2	Korekční křivka pro standardní ozvučnici typu B, průměry reproduktorů = 6 cm, 10 cm, 20cm. Převzato z normy [1].	19
3.1	Montáž reproduktoru na standardní ozvučnici-přepážku. Převzato z normy [1].	20
3.2	Nákres obecné ozvučnice-přepážky. Převzato z normy [4].	21
3.3	Modulární standardní ozvučnice-přepážka: a) zepředu, b) zezadu. . .	22
3.4	Vsadka s reproduktorem: a) zepředu, b) zezadu.	23
3.5	Demontovatelná podstava na modulární standardní ozvučnici-přepážce. . .	23
4.1	Graf kmitočtové charakteristiky reproduktoru SPH 170 ve vzdálenosti 1 m v referenční poloze.	25
4.2	Graf kmitočtové charakteristiky reproduktoru SPH 210 ve vzdálenosti 1 m v referenční poloze.	25
4.3	Graf kmitočtové charakteristiky reproduktorů SPH 210 a SPH 170 ve vzdálenosti 1 m v referenční poloze.	26
4.4	Graf kmitočtové charakteristiky reproduktoru SPH 170 ve vzdálenosti 8 mm v referenční poloze.	27
4.5	Graf kmitočtové charakteristiky reproduktoru SPH 210 ve vzdálenosti 8 mm v referenční poloze.	27
4.6	Graf normalizace kmitočtové charakteristiky reproduktoru SPH 170 na měření ve vzdálenosti 200 mm.	28
4.7	Graf normalizace kmitočtové charakteristiky reproduktoru SPH 210 na měření ve vzdálenosti 200 mm.	29
4.8	Graf normalizace kmitočtové charakteristiky reproduktoru SPH 170 na měření ve vzdálenosti 1 m.	29
4.9	Graf normalizace kmitočtové charakteristiky reproduktoru SPH 210 na měření ve vzdálenosti 1 m.	30
4.10	Graf kmitočtových charakteristik reproduktoru SPH 210 při měření ve vzdálenosti 1 m pro polohu v rohu a v ref. poloze.	31
5.1	Graf kmitočtových charakteristik reproduktoru SPH 210 v 1 m pro polohu 2.13 s a bez podstavy.	33
6.1	Popis nekonečné hrany válcovou soustavou souřadnic. Převzato z [6]. .	34

6.2	Rozložená geometrie konceptu diskrétní Huygensovy interpretace. Převzato z [6].	35
6.3	Graf impulzní odezvy $h_{pp}(t)$	39
6.4	Graf impulzní odezvy $h_p(t)$	39
6.5	Graf impulzní odezvy $h_{model}(t)$	40
6.6	Graf kmitočtové charakteristiky modelu $H(\omega)$ pro rozlišení $\Delta z = 0,4$ mm.	41
6.7	Graf kmitočtové charakteristiky modelu $H(\omega)$ pro rozlišení $\Delta z = 0,5$ mm.	41
6.8	Graf Kompenzace kmitočtové charakteristiky pro SPH 170.	42
6.9	Graf Kompenzace kmitočtové charakteristiky pro SPH 210.	42
6.10	Graf Kompenzace kmitočtové charakteristiky pro SPH 210 v porovnání s měřením v 8 mm.	43
A.1	Náčrtek pro definování konfigurace 1 měřící polohy v bezodrazové komoře.	51
A.2	Náčrtek pro definování měřících poloh v konfiguracích 2 a 3 v bezodrazové komoře.	52
B.1	Graf kmitočtových charakteristik reproduktoru SPH 210 při měření ve vzdálenosti 1 m a různých otočeních přepážky v konfiguraci 1. . . .	54
B.2	Graf kmitočtových charakteristik reproduktoru SPH 210 při měření ve vzdálenosti 1 m pro různý posun přepážky v konfiguraci 1.	54
B.3	Graf kmitočtových charakteristik reproduktoru SPH 210 při měření ve vzdálenosti 1 m pro podobné polohy v konfiguracích 2 a 3.	55
C.1	Graf kmitočtových charakteristik reproduktoru SPH 210 v 1 m při tlumení podstavy vatou MDM-4	56
C.2	Vyzkoušené způsoby tlumení materiálem MDM-4: a) tlumení spoje, b) tlumení desky.	57
D.1	Návrh algoritmu pro výpočet modelu impulzní odezvy difrakcí jedné hrany způsobenými: a) přední stranou reproduktoru, b) zadní stranou reproduktoru.	58

Úvod

Kmitočtová charakteristika reproduktoru je jeden ze stěžejních údajů, který je potřeba znát např. při návrhu ozvučnice nebo reproduktorové soustavy. Způsoby a podmínky pro dosažení určité přesnosti měření kmitočtové charakteristiky, ale i jiných údajů reproduktoru, popisuje norma ČSN EN 60268-5. Norma popisuje i standardní ozvučnici-přepážku, která má v určitých mezích svými vlastnostmi napodobit přepážku nekonečnou. Kvůli konečným rozměrům standardní ozvučnice-přepážky a dalším vlivům dochází ke zkreslení měřené kmitočtové charakteristiky reproduktoru. Samotné zkreslení standardní ozvučnice-přepážky lze modelovat pomocí rozšířené Biot-Tolstoy-Medwinovy metody. Vykompenzováním zkreslení měření (ať už standardní ozvučnice-přepážky nebo jiných negativních vlivů) lze následně dosáhnout přesnějších výsledků měření kmitočtové charakteristiky reproduktoru.

Práce popisuje typy ozvučnic a měření reproduktorů, která jsou na daných ozvučnicích proveditelná, dle normy ČSN EN 60268-5. Ze všech způsobů měření je kladen důraz na měření kmitočtové charakteristiky reproduktoru. Dále je podrobněji popsána standardní ozvučnice-přepážka a její modulární modifikace, která byla použita pro měření v této práci.

Tyto teoretické poznatky následuje řada testovacích měření. Jedná se o měření kmitočtových charakteristik dvou různých reproduktorů měněných na modulární standardní ozvučnici-přepážce a měněných pomocí vsadek. Zhodnoceny jsou výstupy měření pro různé vzdálenosti mikrofonu od reproduktoru a pro různé polohy soustavy ozvučnice a mikrofonu v závislosti na rozměrech bezodrazové komory, ve které byla všechna měření provedena.

Práce dále obsahuje teorii vzniku difrakcí zvuku na hranách objektů a teorii rozšířené Biot-Tolstoy-Medwinovy metody, která lze využít k numerickému modelování difrakcí zvuku na hranách standardní ozvučnice-přepážky. Uvedena je jak teorie obecného, tak i numerického modelu, pomocí kterého se dají modelovat difrakce počítačovými výpočty. Následně je v práci popsána teorie kompenzace zkreslení kmitočtové charakteristiky reproduktoru pomocí tohoto modelu a tyto poznatky jsou využity pro provedení softwarové kompenzace. Výsledky softwarové kompenzace jsou následně zhodnoceny.

1 Ozvučnice dle normy ČSN EN 60268-5

Norma [1] uvádí, že chování reproduktoru je determinováno vlastnostmi reproduktoru samého a jeho akustickou zátěží. Akustická zátěž pak závisí na způsobu montáže reproduktoru.

Pístový pohyb membrány přímo vyzařujícího reproduktoru vytváří akustický tlak na obou stranách membrány, ale okamžitá fáze těchto tlaků je opačná (v okamžiku přetlaku před membránou je tvořen podtlak za membránou). Zvukové vlny s délkou větší než je průměr membrány vyrovnávají přetlak a podtlak a pro tyto kmitočty nastává akustický zkrat, projevující se poklesem kmitočtové charakteristiky. Aby se tomuto akustickému zkratu zamezilo, připevňuje se reproduktor na desku neboli ozvučnici. Tato deska prodlužuje vzdálenost mezi přední a zadní stranou membrány a tím posunuje mezní kmitočet, při němž nastává akustický zkrat, směrem k nižším kmitočetům. [2]



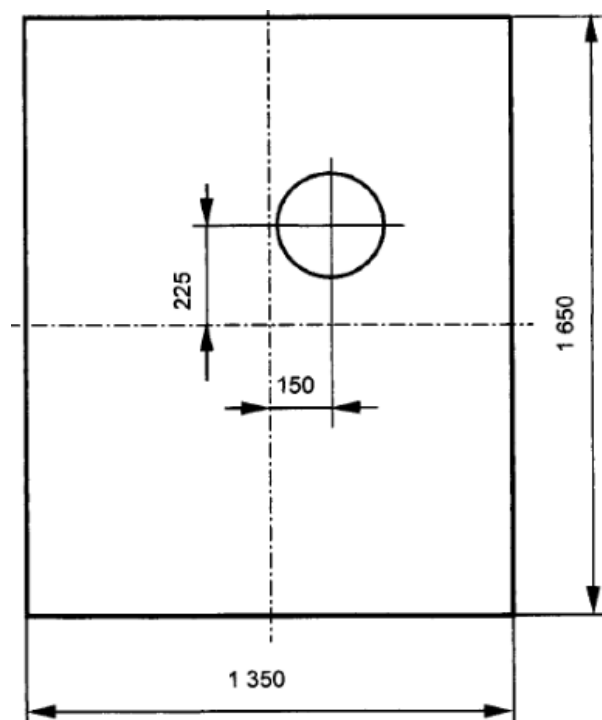
Obr. 1.1: Vznik akustického zkratu. Převzato z knihy [2].

Za účelem standardizace postupů a míry kvality měření jsou v normě [1] popsány tři konkrétní ozvučnice. Jsou uvedeny jejich konstrukční podmínky, způsoby montáže reproduktorů a měření na nich proveditelná.

1.1 Standardní ozvučnice - přepážka

Rovinná deska neboli přepážka je nejjednodušší typ ozvučnice. Její teoretická varianta má nekonečné rozměry. V reálných podmínkách má ovšem rozměry konečné a vlastnostem nekonečné přepážky se jen blíží. Její výhody jsou jednoduchost a nepřítomnost stojatých vln. Nevýhodou je horší účinnost na nízkých kmitočtech. [3]

Standardní ozvučnice-přepážka by měla mít dle normy [1] na přední ploše rovný povrch, který je akusticky odrazivý.



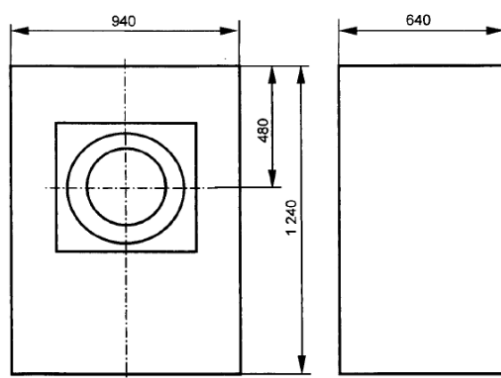
Obr. 1.2: Nákres standardní ozvučnice-přepážky. Převzato z normy [1].

1.2 Standardní ozvučnice - skříň

Zabudováním reproduktoru do hermeticky uzavřené skříně dojde k dokonalému odstranění akustického zkratu. Nevýhodou při měření reproduktoru ve skříňové ozvučnici je například změna rezonančního kmitočtu, vznik stojatých vln ve skříně (lze potlačit vyplněním skříně ozvučnice tlumivým materiálem), snížení charakteristické citlivosti reproduktoru. [2] [3]

1.2.1 Standardní měřicí ozvučnice typu A

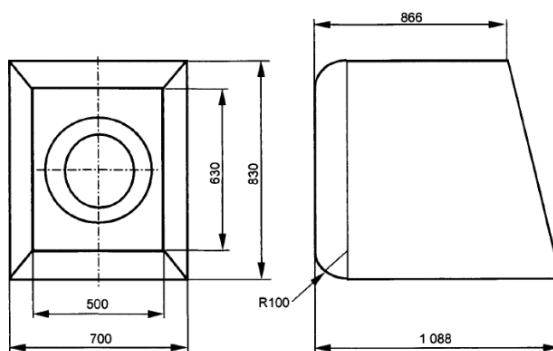
Všechny povrchy této ozvučnice musí být hladké a spoje musí mít pravé úhly. Nejsou povoleny změny zadaných rozměrů. Tímto se docílí opakovatelnosti charakteristiky difrakcí. Díky tomu je tato ozvučnice použitelná pro detailní analýzy, studie a porovnávání reproduktorů. [1]



Obr. 1.3: Nákres standardní měřicí ozvučnice typu A. Převzato z normy [1].

1.2.2 Standardní měřicí ozvučnice typu B

Tato ozvučnice je na rozdíl od standardní ozvučnice typu A uzpůsobená ke změnám v rozměrech. Při zachování poměrů stran je možné použít pro měření ozvučnici větší nebo menší. Pokud je k měření takto škálovaná ozvučnice potřeba, musí výsledky měření obsahovat poznámku s vnějšími rozměry upravené ozvučnice a jejím vnitřním objemem. Nicméně pro akustická měření je doporučeno dodržovat standardní rozměry. Upravené ozvučnice mohou sloužit pouze k subjektivním testům. [1]



Obr. 1.4: Nákres standardní měřicí ozvučnice typu B. Převzato z normy [1].

2 Měření dle normy ČSN EN 60268-5

2.1 Podmínky měření dle ČSN EN 60268-5

Pro snadnou specifikaci nastavení reproduktorů pro daná měření jsou v normě [1] definovány tzv. normální měřicí podmínky. Základem pro vytvoření těchto podmínek je dodržování v normě zmíněných podmínek a znalostí některých hodnot z výrobcova popisu produktu. Jedná se o tzv. "jmenovité hodnoty". Mezi tyto hodnoty patří:

- Jmenovitá impedance
- Jmenovitý kmitočtový rozsah
- Jmenovité sinusové napětí nebo výkon
- Jmenovité šumové napětí nebo výkon
- Referenční rovina
- Referenční bod
- Referenční osa

Normální měřicí podmínky následně stanovují:

- Způsob montáže reproduktoru
- Akustická prostředí a jejich specifikace
- Testovací signály a jejich napětí
- Nutnost specifikaci tlumících prvků
- Správnost zapojení měřicího vybavení

Normální měřicí podmínky se pro některá měření nemusí dodržovat všechna. Pro každý druh měření je uveden výčet, co všechno je nutné splnit.

2.1.1 Montáž reproduktorů dle ČSN EN 60268-5

Chování reproduktoru je určeno jeho vlastnostmi a jeho akustickou zátěží. Akustická zátěž závisí na způsobu montáže, který by měl být jasně uveden zároveň s prezentovanými výsledky. Pro měření by měl být použit jeden ze následujících způsobů montáže:

1. standardní ozvučnice-přepážka, standardní ozvučnice typu A nebo typu B, specifikovaná ozvučnice
2. ve vzduchu bez přepážky nebo ozvučnice
3. v poloprostoru volného pole, v jedné rovině s odrazovou rovinou

Způsoby montáže v prvním bodě se blíží poloprostoru volného pole až do určitého hraničního kmitočtu v nízkých kmitočtech. Tento hraniční kmitočet závisí na zvolené vzdálenosti při měření. Výsledky měření získané pod tímto kmitočtem by měly sloužit pouze pro porovnání. [1]

2.2 Měření dle ČSN EN 60268-5 proveditelná na ozvučnicích dle této normy

Na normou [1] definovaných ozvučnicích lze provádět měření těchto veličin:

- Impedanční charakteristika

Pozn.: Používá se pro měření celkového Q-faktoru dle normy

- Rezonanční kmitočet
- Akustický tlak v daném kmitočtovém pásmu
- Charakteristická citlivost v daném kmitočtovém pásmu
- Kmitočtová charakteristika

Pozn.: Používá se pro měření efektivního kmitočtového rozsahu dle normy

- Přenosová funkce
- Akustický výkon / Střední akustický výkon v daném kmitočtovém pásmu
- Efektivita / Střední efektivita v daném kmitočtovém pásmu
- Vzor směrové odezvy

Pozn.: Používá se pro měření vyzařovacího úhlu dle normy

- Index směrovosti
- Úhly pokrytí
- Harmonické zkreslení a harmonické zkreslení n-tého řádu (2. nebo 3.)
- Modulační zkreslení n-tého řádu a charakteristické modulační zkreslení n-tého řádu (2. nebo 3.)
- Rozdílové frekvenční zkreslení

Vzhledem k rozdílným vlastnostem těchto ozvučnic, je nutné s výsledky měření uvádět typ zvolené ozvučnice a případně i její rozměry, pokud je povoleno je měnit.

2.2.1 Měření kmitočtové charakteristiky dle ČSN EN 60268-5

Výsledkem tohoto měření je závislost hladiny akustického tlaku na kmitočtu a norma [1] jej definuje následovně:

Způsob měření

1. Reprodukční by měl být uveden do normálních měřicích podmínek (viz 2.1) v poloprostoru volného pole nebo ve volném poli.
2. Do reproduktoru by měl být dodáván signál typu sinus nebo pásmo šumu o konstantním napětí.
3. Měření by mělo být provedeno alespoň na celém efektivním kmitočtovém rozsahu daného reproduktoru.

4. Výsledky by měly být prezentovány grafem jako funkce kmitočtu. Zároveň by měl být i uveden zvolený typ prostoru a vstupního signálu.

Korekce měření na nízkých kmitočtech

Pokud bezodrazová komora způsobuje takové pohlcování nízkých kmitočtů, že dochází k výchylce od podmínek pro volné pole, při které není možné přesné měření kmitočtové charakteristiky ve volném poli do nejnižšího kmitočtu efektivního kmitočtového rozsahu reproduktoru, mělo by být měření na nízkých kmitočtech opraveno následovně:

1. Testovaný reproduktor by měl být nahrazen kalibrovaným referenčním reproduktorem umístěným tak, že jeho referenční bod a referenční osa jsou ve stejné pozici jako u reproduktoru testovaného.

Tento referenční reproduktor by měl mít v oblasti kmitočtů vyžadujících korekci stejnou směrovou charakteristiku jako reproduktor testovaný. Jeho kalibrovaná kmitočtová charakteristika ve volném poli by měla dosahovat nejnižšího kmitočtu požadovaného pro měření.

Pozn.: Je nezbytně nutné přesně určit kmitočtovou charakteristikou referenčního reproduktoru. Pro referenční reproduktory s kmitočtovou charakteristikou omezenou na nízkých kmitočtech (hlavní rezonance nad 150 Hz) je měření ve velmi velké bezodrazové komoře (např. 8 m × 10 m × 12 m) považováno za dostatečně přesné. Pro referenční reproduktory s kmitočtovou charakteristikou rozšířenou na nižších kmitočtech může být nutné měření na věži ve vzduchu, ve výšce alespoň 10 m.

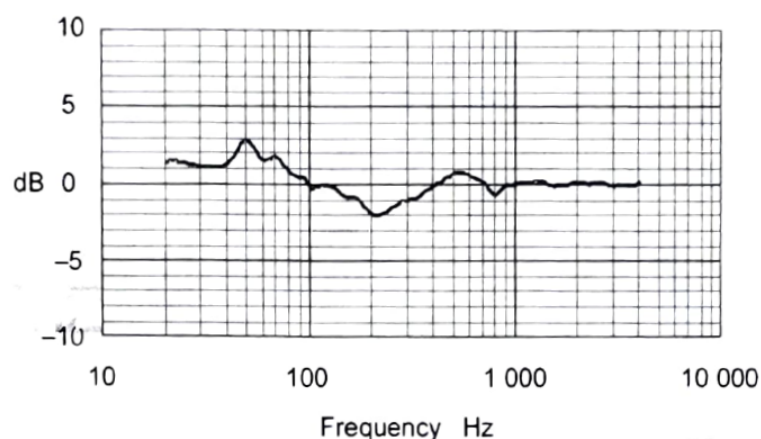
2. Kmitočtová charakteristika referenčního reproduktoru by měla být měřena pomocí stejného vybavení a za stejných podmínek jako u reproduktoru testovaného.
3. Rozdíly mezi kalibrační a naměřenou kmitočtovou charakteristikou referenčního reproduktoru v oblasti nízkých kmitočtů slouží k následné korekci kmitočtové charakteristiky reproduktoru testovaného.

Měření kmitočtové charakteristiky na standardní ozvučnici typu A

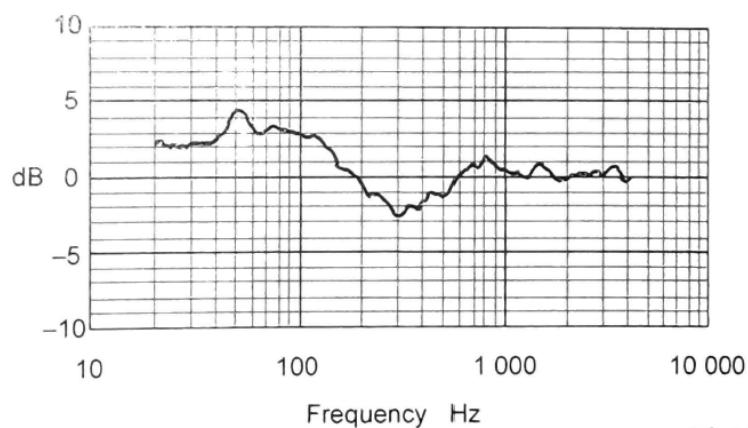
Norma [1] uvádí pro standardní ozvučnici typu A dvě korekční křivky pro standardní difrakční vlivy ozvučnice při měření ve vzdálenosti 1 m na referenční ose ve volném poli nebo v poloprostoru volného pole.

Měření kmitočtové charakteristiky na standardní ozvučnici typu B

Norma [1] také uvádí dvě korekční křivky pro standardní ozvučnici typu B pro stejné měření jako u standardní ozvučnice typu A.



Obr. 2.1: Korekční křivka pro standardní ozvučnici typu A, průměry reproduktorů = 30 cm, 38 cm, 46 cm. Převzato z normy [1].



Obr. 2.2: Korekční křivka pro standardní ozvučnici typu B, průměry reproduktorů = 6 cm, 10 cm, 20cm. Převzato z normy [1].

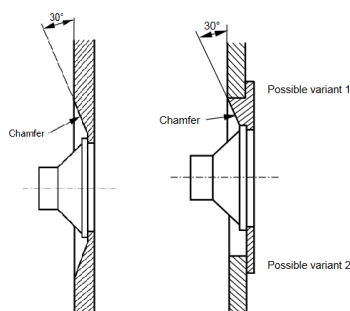
Měření kmitočtové charakteristiky na standardní-přepážce

Pro měření na standardní ozvučnici-přepážce NENÍ definovaná žádná korekční křivka.

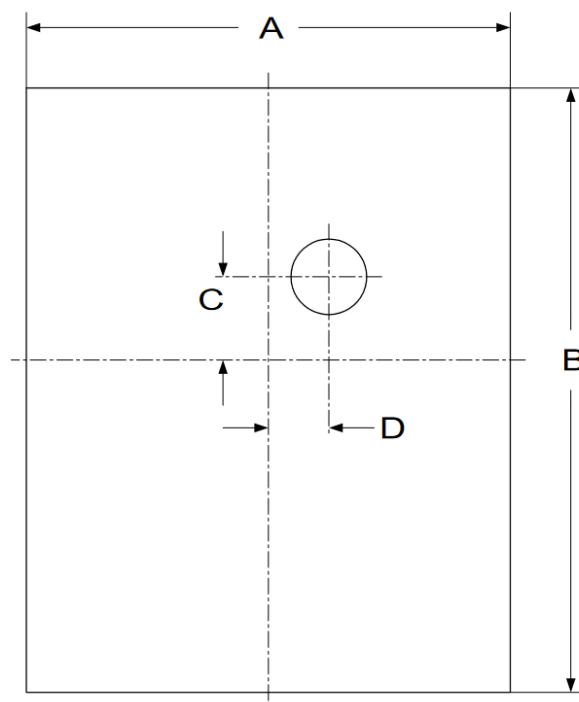
3 Konstrukční uspořádání standardní ozvučnice-přepážky

Jako konstrukční podmínky standardní ozvučnice-přepážky jsou v normě [1] uvedeny přesné rozměry předního panelu a dva způsoby montáže reproduktoru. Při montáži reproduktoru je důležité dbát na to, aby hrany reproduktoru a přední strana přepážky byly zároveň. Dále je také požadována dostatečná tloušťka materiálu pro zajištění zanedbatelné vibrace standardní ozvučnice-přepážky.

Co se rozměrů standardní ozvučnice-přepážky týče, norma [1] neřeší rozměry měřeného reproduktoru. Nicméně Audio Engineering Society v jedné ze svých norm [4] doporučuje pro reproduktory s nominálním průměrem větším než 8 palců použít místo standardní ozvučnice-přepážky přepážku modifikovanou, která z konstrukčního uspořádání standardní ozvučnice-přepážky vychází. Tato modifikovaná přepážka ovšem není žádnou standardní ozvučnicí, a proto je s výsledky měření nutné prezentovat i detailní popis její konstrukce.



Obr. 3.1: Montáž reproduktoru na standardní ozvučnici-přepážku. Převzato z normy [1].



Obr. 3.2: Nákres obecné ozvučnice-přepážky. Převzato z normy [4].

Rozměry standardní ozvučnice-přepážky			
<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
1350 mm	1650 mm	225 mm	150 mm

Tab. 3.1: Tabulka rozměrů pro standardní ozvučnici-přepážku dle normy [1].

Rozměry modifikované ozvučnice-přepážky				
Nominální průměr reproduktoru	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
200 mm (8 ")	1350 mm	1650 mm	225 mm	150 mm
250 mm (10 ")	1690 mm	2065 mm	280 mm	190 mm
315 mm (12 ")	2025 mm	2475 mm	340 mm	225 mm
400 mm (15 ")	2530 mm	3090 mm	420 mm	280 mm
500 mm (18 ")	3040 mm	3715 mm	505 mm	340 mm

Tab. 3.2: Tabulka rozměrů modifikovaných přepážek dle doporučení AES [4].

3.1 Konstrukční uspořádání modulárního řešení standardní ozvučnice-přepážky

V praktické části této práce byla zkoumána modulární standardní ozvučnice-přepážka. Jedná se o standardní ozvučnici-přepážku, upravenou následovně:

- Tloušťka samotné desky je 35 mm. Na přední i zadní stranu je po celé ploše nalepena vrstva kobercového materiálu o tloušťce 1 mm. Celková tloušťka je tedy 37 mm.
- Montáž reproduktoru se provádí pomocí vsadky. Každý reproduktor má svou vlastní vsadku, tudíž se při výměně reproduktorů mění celá vsadka.
- Ke spodní hraně je připevněn odnímatelný podstavec. Přepážka tedy může stát na podstavci o rozměrech 40 mm × 1350 mm × 608 mm.
- Pro snadné přenášení jsou do zadní strany přepážky zabudována dvě madla.



(a)

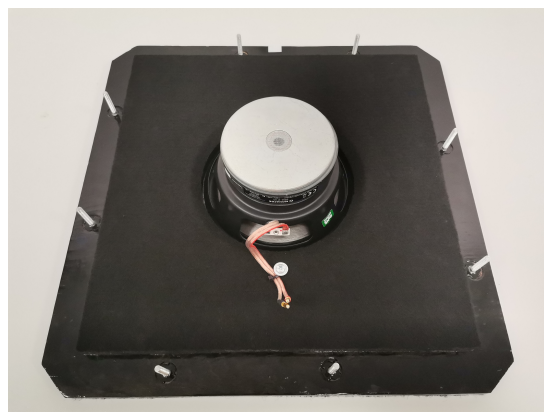


(b)

Obr. 3.3: Modulární standardní ozvučnice-přepážka: a) zepředu, b) zezadu.



(a)



(b)

Obr. 3.4: Vsadka s reproduktorem: a) zepředu, b) zezadu.



Obr. 3.5: Demontovatelná podstava na modulární standardní ozvučnici-přepážce.

4 Výsledky testovacích měření

Za účelem pochopení, jakými vlivy je zkresleno měření kmitočtové charakteristiky reproduktoru na modulární standardní ozvučnici-přepážce v bezodrazové komoře o rozměrech $6,08 \times 5,00 \times 3,15$ metrů, byla provedena sada testovacích měření.

Měřeny byly 2 reproduktory, Monacor SPH 170 a Monacor SPH 210. Během všech měření byly napájeny napětím potřebným k dosažení příkonu 1 W a namontovány na modulární standardní ozvučnici-přepážce pomocí vsadky. Všechna měření probíhala v bezodrazové komoře. K měření byl použit analyzátor Audio Precision APx525 zároveň se softwarem APx500 verze 4.6. Jako zesilovač reproduktoru byl použit transducer Audio Precision APx1701. Ke snímání reproduktorů byl použit mikrofón Brüel & Kjær 4189-B-001 se zesilovačem Nexus 2691 od stejného výrobce.

Jelikož měření byla prováděna v různých polohách v bezodrazové komoře, je u každého měření uvedeno kromě stručného popisu i číslo polohy. Podle tohoto čísla je možné v příloze A dohledat bližší informace k danému měření.

4.1 Měření kmitočtové charakteristiky ve vzdálenosti 1 m - 1. část

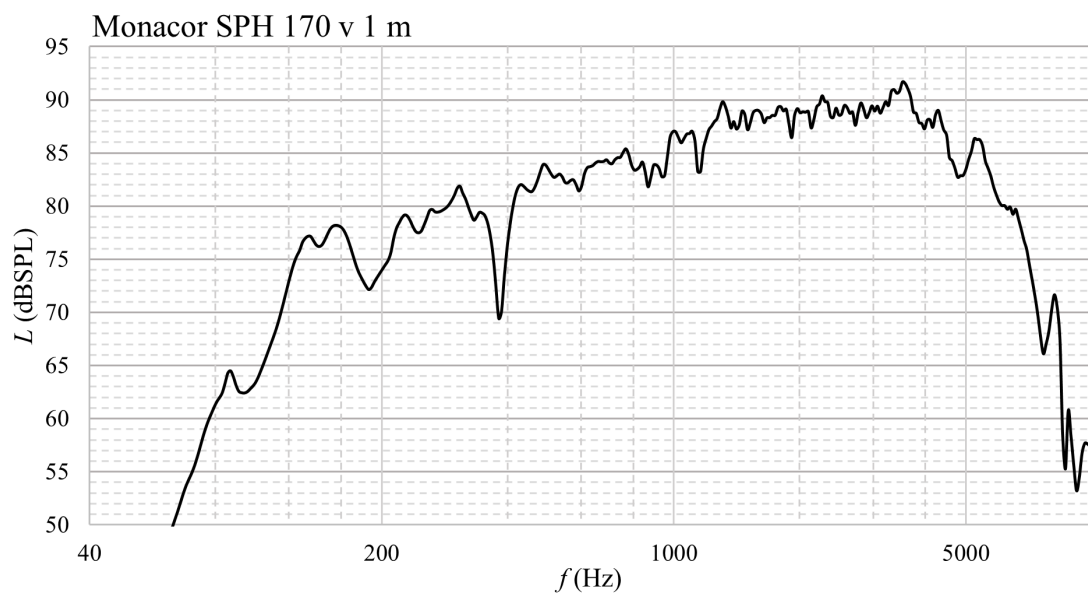
V první sadě testovacích měření byly zkoumány vlivy jiné než reproduktor sám na jeho měřenou kmitočtovou charakteristiku.

Je zavedena tzv. referenční poloha (Poloha 1.1, viz A.1). V této poloze byly měřeny oba reproduktory (SPH 170 a SPH 210). Vzdáleností 1 m je myšlena vzdálenost ochranné mřížky mikrofónu od kulového vrchlíku reproduktoru. Mikrofón byl vždy v referenční ose reproduktoru.

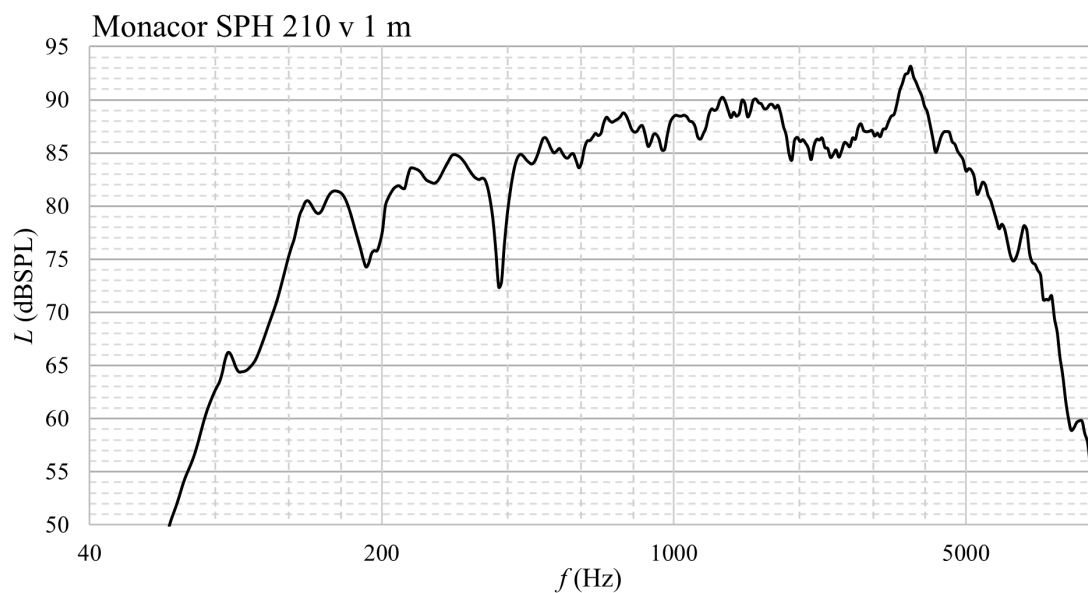
Kmitočtové charakteristiky obou měřených reproduktorů jsou na první pohled, především na kmitočtech nižších než 400 Hz, zvlněné. Je nutné ověřit která zvlnění způsobuje chyba měření a co je skutečná kmitočtová charakteristika reproduktorů.

Chybou měření jsou odrazy zvukových vln od samotné modulární standardní ozvučnice-přepážky nebo vlastní kmity místnosti. Porovnáním kmitočtových charakteristik obou reproduktorů lze sledovat jisté podobnosti mezi průběhy obou charakteristik. Tyto podobnosti mohou právě být způsobeny přepážkou nebo místností. Zvlnění kmitočtových charakteristik na nízkých kmitočtech pravděpodobně ovlivňuje bezodrazová komora. Z praxe je totiž známo, že se v ní šíří stojaté vlnění do kmitočtu 200 Hz. V kmitočtech od 200 Hz lze v měřených charakteristikách pozorovat velký propad na kmitočtu 381 Hz, což je v této oblasti nejvýraznější zvlnění charakteristik. Pravděpodobně je způsobeno interferencí přímé vlny a vlny odražené od podstavy modulární standardní ozvučnice-přepážky, protože vlna odražená

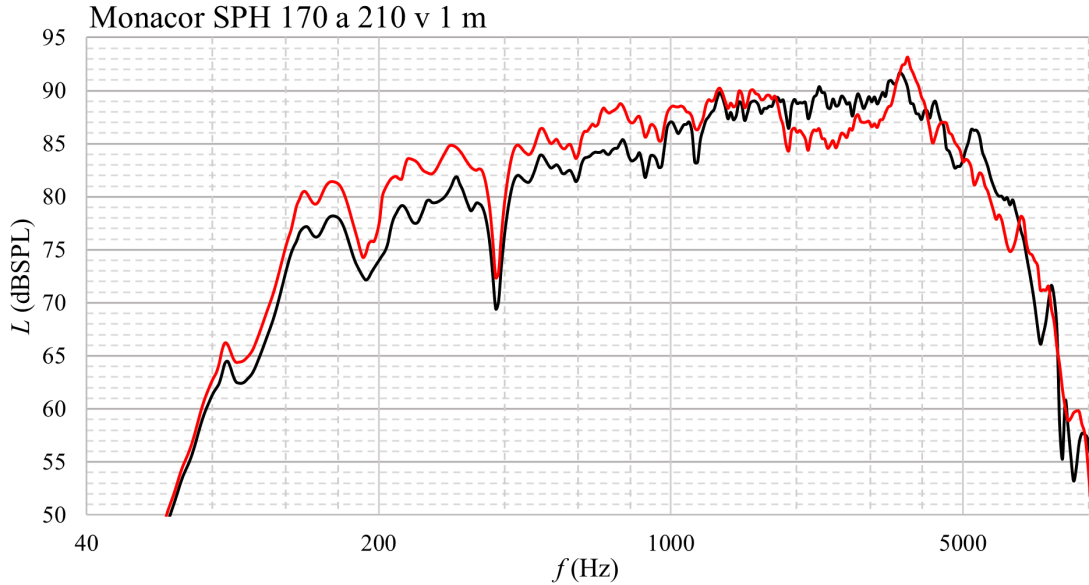
od podstavy je v místě mikrofonu zpožděná zhruba o 1,5 periody a tím pádem v protifázi.



Obr. 4.1: Graf kmitočtové charakteristiky reproduktoru SPH 170 ve vzdálenosti 1 m v referenční poloze.



Obr. 4.2: Graf kmitočtové charakteristiky reproduktoru SPH 210 ve vzdálenosti 1 m v referenční poloze.



Obr. 4.3: Graf kmitočtové charakteristiky reproduktorů SPH 210 a SPH 170 ve vzdálenosti 1 m v referenční poloze.

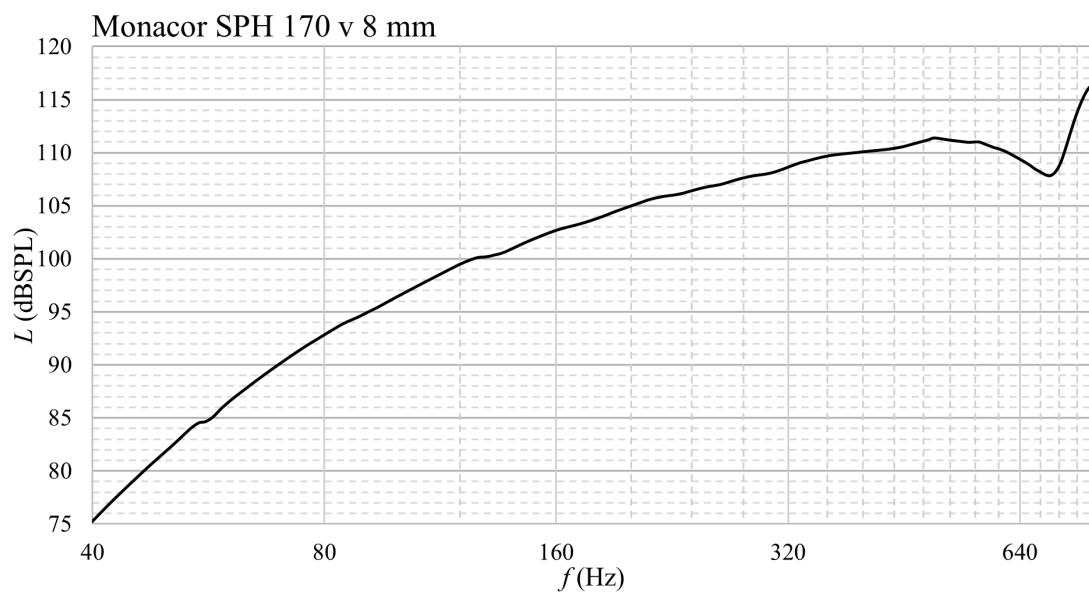
4.2 Měření kmitočtové charakteristiky v blízkém poli

Měření v blízkém poli bylo použito pro měření kmitočtových charakteristik na nízkých kmitočtech, jelikož netrpí na vlivy stojatého vlnění v místnosti [5]. Za účelem co nejmenšího vlivu okolního prostředí byla zvolena vzdálenost mřížky mikrofonu 8 mm od kulového vrchlíku reproduktoru, jelikož při této vzdálenosti ještě nedojde ke kontaktu mřížky mikrofonu a membrány reproduktoru. Měření bylo provedeno opět na obou reproduktorech a vždy v měřící poloze 1.1 (viz A.1).

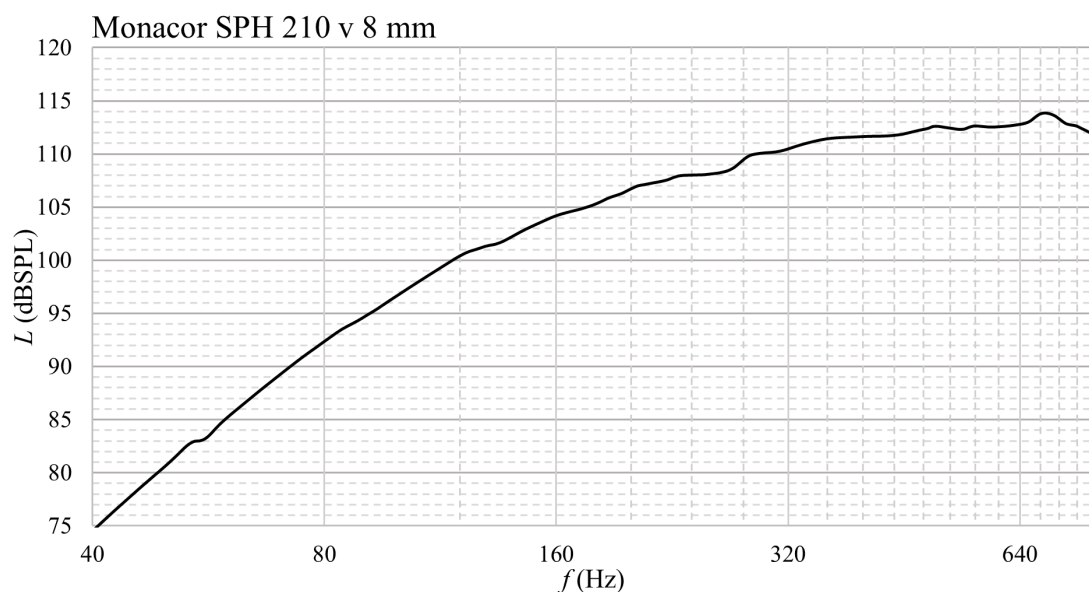
Kmitočtové charakteristiky obou reproduktorů v blízkém poli vykazují minimální zvlnění. To potvrzuje nedokonalost bezodrazové komory na nízkých kmitočtech. Dle článku [5] pro kmitočtovou charakteristiku při měření v blízkém poli existuje maximální kmitočet, od kterého nelze naměřené hodnoty považovat za relevantní. Tento kmitočet lze určit dle vztahu:

$$f_{\max} \leq \frac{58,749}{r_{\text{ef}}}, \quad (4.1)$$

kde r_{ef} představuje efektivní poloměr reproduktoru na nekonečné přepážce nebo nejkratší vzdálenost od středu reproduktoru ke kraji ozvučnice, což je v případě standardní ozvučnice-přepážky 0,6 m. Výpočty byl pro standardní ozvučnici-přepážku určen kmitočet $f_{\max} \leq 91$ Hz. Od tohoto kmitočtu je nutné brát naměřená data jako orientační. Důkazem toho je např. zákmit v charakteristice reproduktoru SPH 170 v 8mm na 700 Hz.



Obr. 4.4: Graf kmitočtové charakteristiky reproduktoru SPH 170 ve vzdálenosti 8 mm v referenční poloze.



Obr. 4.5: Graf kmitočtové charakteristiky reproduktoru SPH 210 ve vzdálenosti 8 mm v referenční poloze.

Aby se dala měření ze vzdáleností 8 mm a 1 m lépe porovnávat, je potřeba hladiny akustického tlaku normalizovat tak, aby odpovídaly stejné vzdálenosti od reproduktoru. Vzhledem k tomu, že akustický tlak ubývá úměrně se vzdáleností od zdroje, je možné pro výpočet akustické hladiny použít vztah:

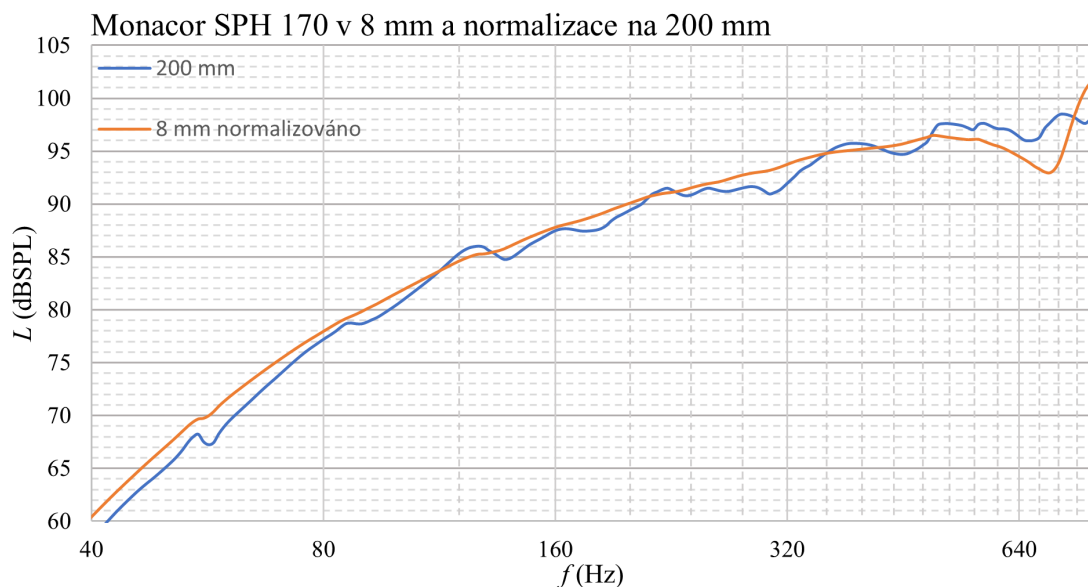
$$L_2 = L_1 + 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{r_1}{r_2} \right), \quad (4.2)$$

kde r_1 a r_2 představuje poloměr kulové vlny se středem v místě zdroje zvuku. Problémem tohoto postupu je neznalost umístění zdroje zvuku, za ten se u reproduktoru totiž považuje referenční bod. Kde se tento bod nachází, by dle normy [1] měl udávat výrobce. V případě měřených reproduktorů tomu tak není. Pokud jsou známy obě hladiny akustického tlaku L_2 a L_1 a rozdíl vzdáleností $r_2 - r_1$, je možné úpravou rovnice (4.2) dopočítat vzdálenost kulového vrchlíku od referenčního bodu, jakožto poloměr kulové vlny:

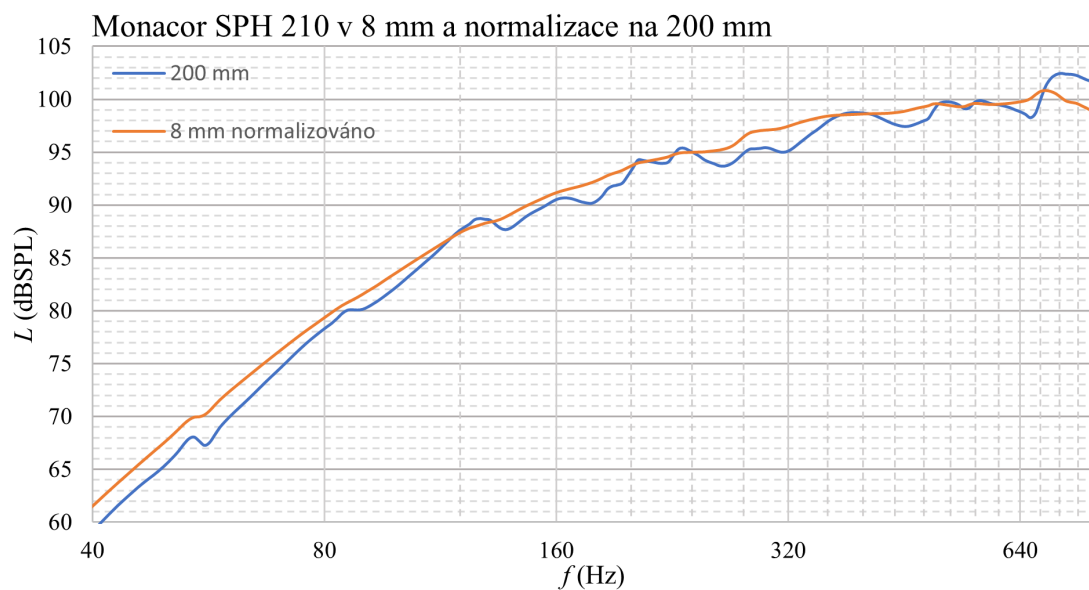
$$r_1 = \frac{(r_2 - r_1) \cdot 10^{\frac{L_2 - L_1}{20}}}{1 - 10^{\frac{L_2 - L_1}{20}}}. \quad (4.3)$$

Jelikož při měření byla vzdálenost mikrofону od kulového vrchlíku vždy měřena obyčejným metrem, je nutné porovnávat měření z co největší vzdálenosti. Za tímto účelem byly změřeny pro oba reproduktory kmitočtové charakteristiky pro vzdálenost mikrofону od kulového vrchlíku 200 mm, kdy je chyba způsobená vzdáleností membrány mikrofону od jeho ochranné mřížky nebo špatným měřením vzdálenosti méně drastická. V této vzdálenosti od kulového vrchlíku není ještě kmitočtová charakteristika natolik zvlněná, takže je pro výpočet použitelná.

Vzdálenosti referenčního bodu a kulového vrchlíku, resp. poloměry kulových vln v místě vrchlíku jsou dle rovnice (4.3) pro SPH 170: $r_1 = 34,0$ mm a pro SPH 210 $r_1 = 47,4$ mm.

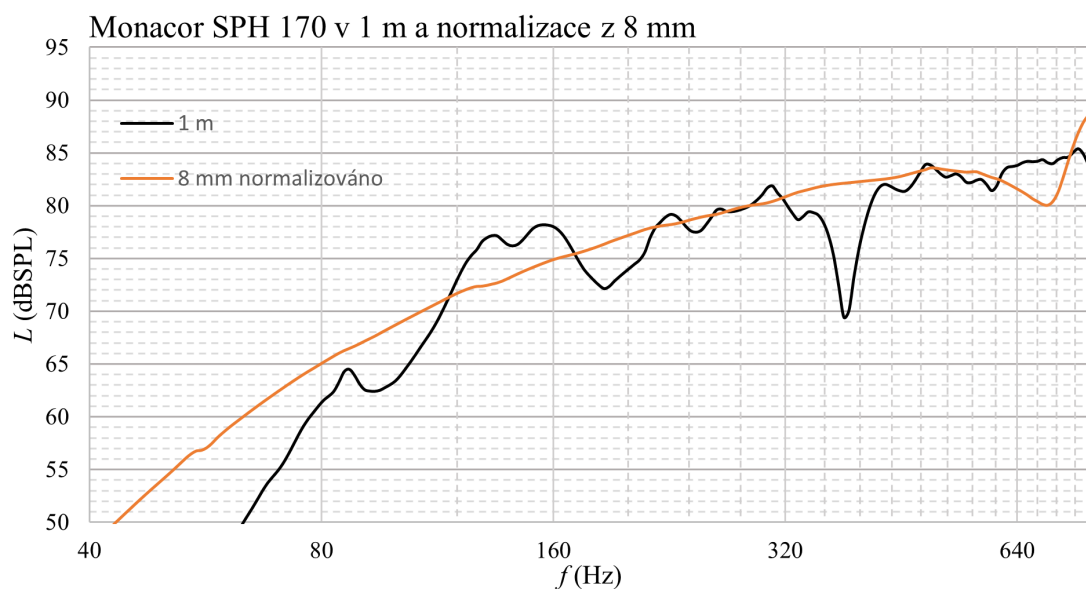


Obr. 4.6: Graf normalizace kmitočtové charakteristiky reproduktoru SPH 170 na měření ve vzdálenosti 200 mm.

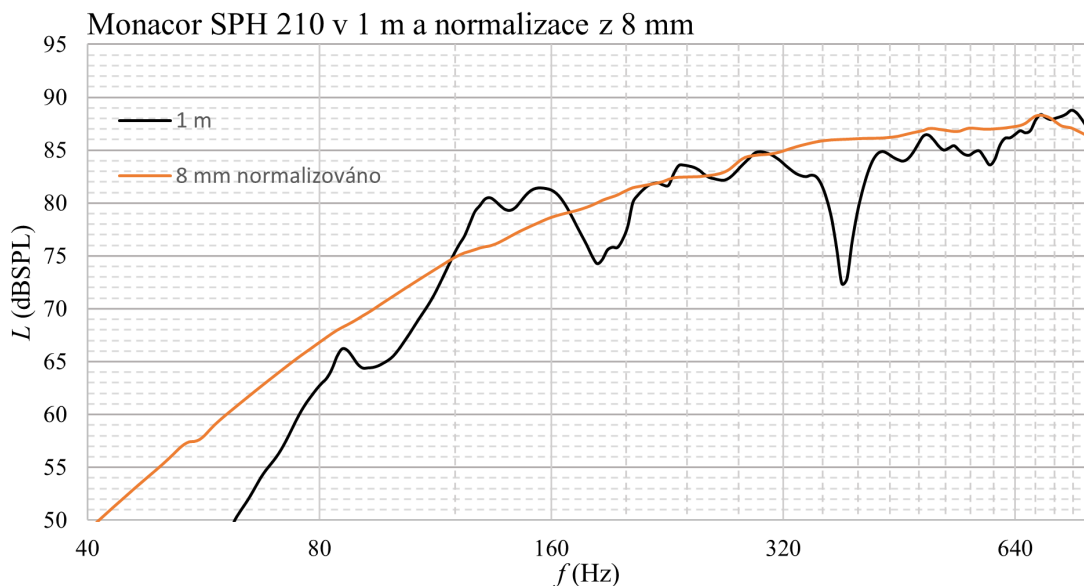


Obr. 4.7: Graf normalizace kmitočtové charakteristiky reproduktoru SPH 210 na měření ve vzdálenosti 200 mm.

Z průběhů normalizovaných na vzdálenost 200 mm od kulového vrchlíků se dá usoudit, že normalizace pomocí dopočítaného referenčního bodu reproduktoru je proveditelná. Nyní je možné pomocí normalizace porovnat také měření v 8 mm s měření v 1 m.



Obr. 4.8: Graf normalizace kmitočtové charakteristiky reproduktoru SPH 170 na měření ve vzdálenosti 1 m.



Obr. 4.9: Graf normalizace kmitočtové charakteristiky reproduktoru SPH 210 na měření ve vzdálenosti 1 m.

Kmitočtová charakteristika měřená v blízkém poli po normalizaci na vzdálenost 1 m prokazuje, jak moc jsou měření v 1 m na nízkých kmitočtech zkreslená. Pod 200 Hz je zkreslení výraznější, než nad 200 Hz, kde se již křivky k sobě více přibližují s výjimkou propadu na 381 Hz.

4.3 Měření kmitočtové charakteristiky ve vzdálenosti 1 m - 2. část

Standardní ozvučnice-přepážka na nízkých kmitočtech simuluje poloprostor [1], respektive rozdělí bezodrazovou komoru na dva menší prostory. Toto bylo ověřeno 2. sérií měření kmitočtových charakteristik měřených ve vzdálenosti 1 m.

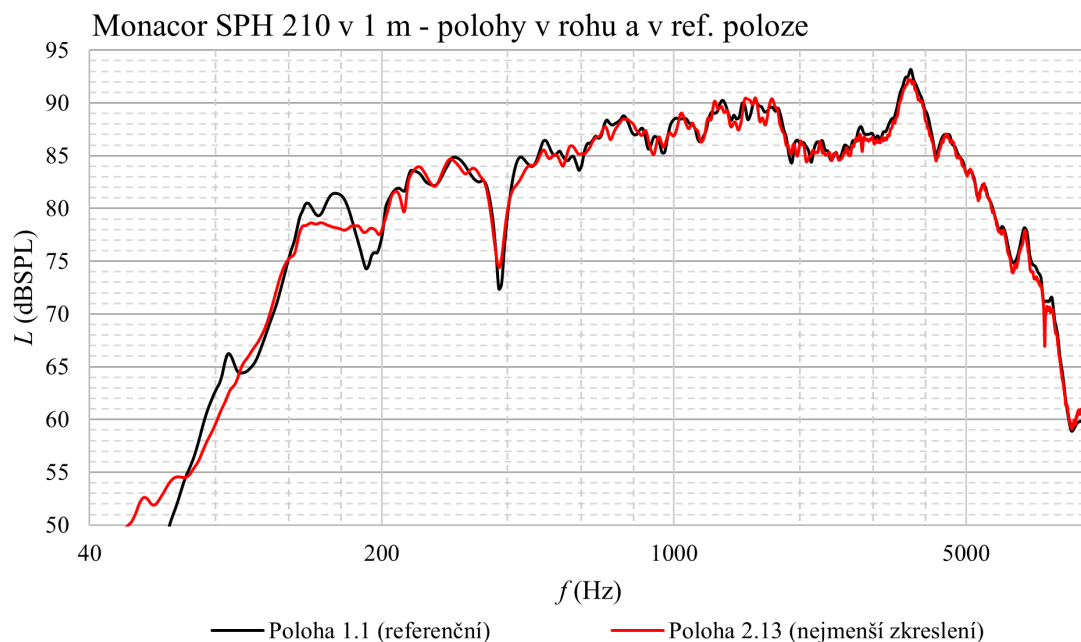
Přepážka byla buď otáčena ve směru hodinových ručiček do poloh 45 a 90 stupňů od referenční polohy (polohy 1.2 a 1.3 z přílohy A.1). Při porovnání těchto kmitočtových charakteristik s charakteristikou získanou v referenční poloze, je na všech kmitočtech jasně vidět změna velikosti a tvaru daného poloprostoru. Nejvíce se tak děje na nízkých kmitočtech. V pásmu od 100 Hz do 3 kHz výkyvy slábnou a od 3 kHz dále je zvlnění už minimální. Viz B.1

Další měření kmitočtové charakteristiky mimo referenční polohu bylo provedeno nikoliv otočením, ale posunutím přepážky. Ta byla posunuta o celou svoji šířku 135 cm směrem k pravé stěně (poloha 1.4 z přílohy A.1). Při porovnání s charakteristikou měřenou v referenční poloze lze sledovat velmi malé rozdíly, jelikož velikost

poloprostoru tvořeného přepážkou se téměř nemění. Viz B.2

Vzhledem k vlivu rozměrů a tvaru poloprostoru vytvořeným přepážkou a stěnami bezodrazové komory na měřenou kmitočtovou charakteristiku, je potřeba najít takovou polohu, ve které bude docházet k minimálnímu zkreslení. Tato poloha byla hledána v rozích bezodrazové komory, protože v těchto místech se na měřené kmitočtové charakteristiky nejméně podepisuje stojaté vlnění vyskytující se pod 200 Hz. Nepovedlo se najít naprosto dokonalou nezkreslenou měřící polohu, to je totiž v daných podmínkách nemožné. Byla tedy zvolena poloha vykazující nejmenší zkreslení kmitočtové charakteristiky.

Ze všech měření byla zvolena poloha 2.13 (viz A.2). Kmitočtová charakteristika reproduktoru SPH 210 změřená zde v porovnání s charakteristikou v referenční poloze je vidět na následujícím grafu. Poloha byla vybrána především pro výsledky měření na kmitočtech 100 - 200 Hz, kde kmitočtová charakteristika oproti jiným měřením vykazuje minimální zvlnění.



Obr. 4.10: Graf kmitočtových charakteristik reproduktoru SPH 210 při měření ve vzdálenosti 1 m pro polohu v rohu a v ref. poloze.

Při hledání ideální polohy bylo vybíráno z měření v jednom konkrétním rohu bezodrazové komory (konfigurace 2 z přílohy A.2). Je pravděpodobné, že ideální poloha není jen jedna a v ostatních rozích místnosti by bylo po několika měřeních možné najít podobnou charakteristiku. Vzhledem k časové náročnosti těchto měření byla hledána poloha pouze jedna. Při srovnání dvou podobných poloh v rozdílných rozích komory dochází k podobným výsledkům, viz graf B.3 v příloze.

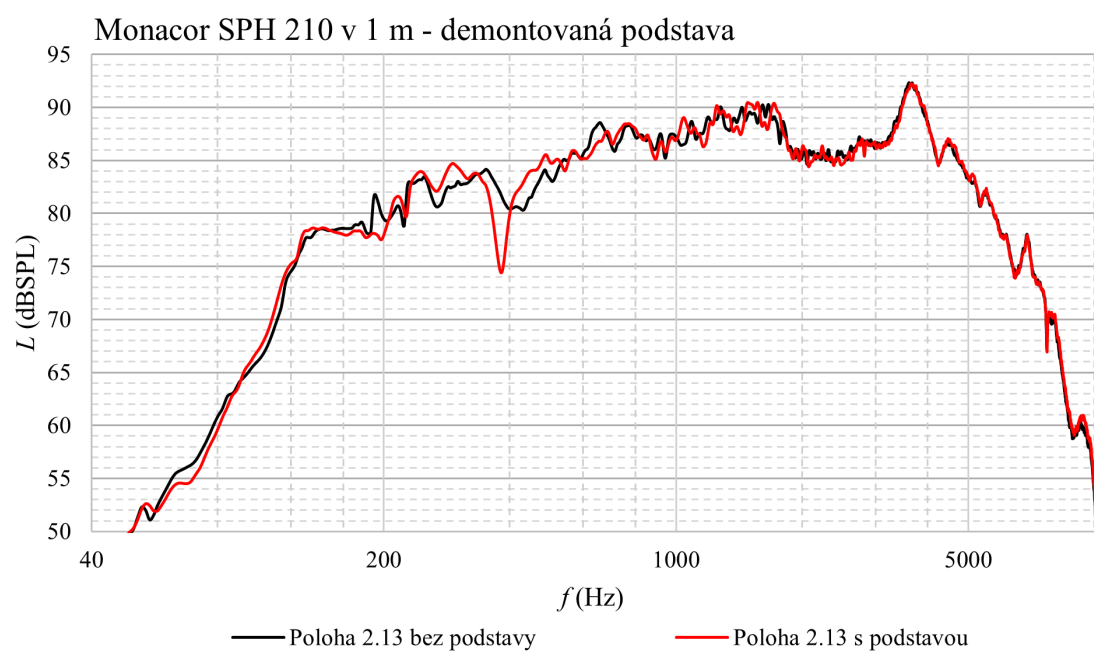
5 Kompenzace vlivů podstavy

V kapitole 4 byly popsáno, že při měření kmitočtové charakteristiky ve vzdálenosti 1 m dochází ke zkreslení výsledků. Podstava modulární standardní ozvučnice - přepážky musí mít na tomto zkreslení podíl, jelikož je to odrazivá plocha pro zvuk.

Byly vyzkoušeny dva způsoby kompenzace tohoto zkreslení: pokrytí podstavy tlumícím materiálem a úplná demontáž podstavy. Při tlumení odrazů tlumícím materiálem došlo k minimálnímu zlepšení výsledků. Došlo k zmírnění propadu kmitočtové charakteristiky na 381 Hz zhruba o 2 dB a nikde jinde se tlumení alespoň v takovéto míře neprojevovalo. Lepších výsledků by se dalo dosáhnout použitím hustšího tlumícího materiálu, jelikož vata typu MDM-4, používaná na vytlumení reproduktorových ozvučnic, je nedostačující, jelikož je určena k tlumení stojatých vlnění o vyšších kmitočtech. Jak byl tlumící materiál použit je vidno v příloze C.

Druhý způsob kompenzace - demontáž podstavy je pochopitelně mnohem účinnější. Při měření bez podstavy ovšem nastává problém se stabilitou zbytku modulární standardní ozvučnice-přepážky. Ideálním řešením je ukotvit přepážku do prostoru něčím s minimální odrazivou plochou. Třeba několika lany. V konkrétním případě této práce byla podstava nahrazena dvěma deskami o rozměrech 30 cm × 20 cm × 3 cm. Standardní ozvučnice-přepážka byla deskami podložena tak, že desky byly nejdelším rozměrem kolmo k přepážce a zvedaly ji o 20 cm nahoru. Samotné desky jsou ovšem nestabilní, tudíž zezadu přepážky ještě musí být nějak ukotvena. V konkrétním případě ukotvení zajišťoval člověk, který ji přidržoval. Jelikož člověk přidržující přepážku ji nedokáže udržet tak, aby byl mikrofon ve správné vzdálenosti a především v referenční ose reproduktoru, nejedná se o naprosto přesné měření.

V následujícím grafu je vidět srovnání kmitočtových charakteristik měřených v poloze 2.13 (viz A.2) s a bez namontované podstavy na modulární standardní ozvučnici-přepážce. Je vidět, že podstava nezpůsobuje pouze propad charakteristiky na 381 Hz, ale i další výkyvy (např. na 200 Hz). Tyto výkyvy se demontáží podstavy zredukovaly, charakteristika je tedy méně zvlněná.



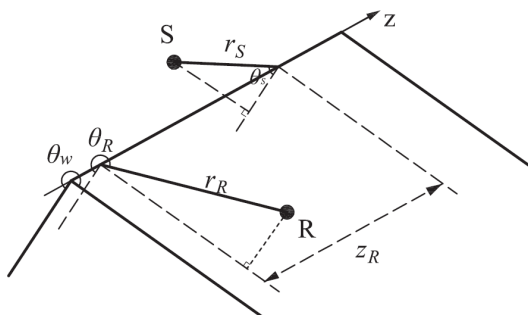
Obr. 5.1: Graf kmitočtových charakteristik reproduktoru SPH 210 v 1 m pro polohu 2.13 s a bez podstavy.

6 Kompenzace vlivů difrakcí

Další z příčin zkreslení měřené kmitočtové charakteristiky jsou difrakce zvuku. Je-li také má standardní ozvučnice-přepážka konečné rozměry, vznikají vyzařováním reproduktoru na jejích hranách. Jak vznikají a jak je kompenzovat popisuje článek [6].

6.1 Teorie rozšířené Biot-Tolstoy-Medwinovy metody

Článek [6] uvádí jako způsob modelování impulzní odezvy difrakcí vznikajících na standardní ozvučnici - přepážce rozšířenou Biot-Tolstoy-Medwinovu metodu. V rámci metody je uveden model nejprve pro nekonečnou hranu. Ta je popsána válcovou soustavou souřadnic následovně: Nekonečnou hranu v systému představuje osa z a dle souřadnic $(r_S, \theta_S, 0)$ je vůči ní v prostoru umístěn bodový zdroj zvuku S a dle souřadnic (r_R, θ_R, z_R) bodový přijímač zvuku R . θ_w je vnější úhel hrany. Následně je také definován koncept diskrétní interpretace Huygensova principu nekonečné hrany, kde se opět nachází zdroj S a přijímač R . Na hraně se pak nachází sekundární zdroje signálu SS_n a $SS_{n'}$, kdy přes každý pár sekundárních zdrojů putuje zvuk stejně dlouho po trajektoriích m_u a l_u nebo m_l a l_l , tedy $m_u + l_u = m_l + l_l$. Na hraně je také definován bod Q , který leží na trajektorii nejkratší cesty zvuku SS_0 .

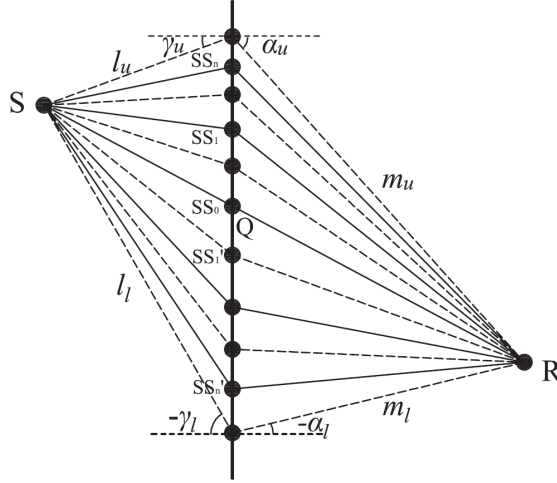


Obr. 6.1: Popis nekonečné hrany válcovou soustavou souřadnic. Převzato z [6].

Předpokládá se že zdrojovým signálem zdroje zvuku S je signál $q(t) = \rho_0 A(t)/4\pi$, kde $A(t)$ je objemové zrychlení a ρ_0 je hustota kapaliny. Nejkratší doba cesty zvuku je definována jako $\tau_0 = [(r_S + r_R)^2 + z_R^2]^{1/2} / c$, kde c je rychlost šíření zvuku ve vzduchu a další proměnné jsou souřadnice použitého válcového systému. Obecný model impulzní odezvy difrakce v přijímači je:

$$h_{\text{difr}}(\tau) = -\frac{c\nu}{2\pi r_S r_R} \frac{\beta(\tau)}{\sinh \eta(\tau)} H(\tau - \tau_0), \quad (6.1)$$

kde



Obr. 6.2: Rozložená geometrie konceptu diskrétní Huygensovy interpretace. Převzato z [6].

$$\beta(\tau) = \beta_{++}(\tau) + \beta_{+-}(\tau) + \beta_{-+}(\tau) + \beta_{--}(\tau), \quad (6.2)$$

$$\beta_{\pm\pm}(\tau) = \frac{\sin[\nu(\pi \pm \theta_S \pm \theta_R)]}{\cosh[\nu\eta(\tau)] - \cos[\nu(\pi \pm \theta_S \pm \theta_R)]}, \quad (6.3)$$

$$\eta(\tau) = \cosh^{-1} \frac{c^2\tau^2 - (r_S^2 + r_R^2 + z_R^2)}{2r_S r_R}, \quad (6.4)$$

kde ν je index hrany $\nu = \pi/\theta_W$ a $H(\tau - \tau_0)$ je Heavisidova funkce neboli jednotkový skok. [6]

Akustický tlak difrakce všech sekundárních zdrojů lze spočítat jako integrál přes všechny možné propagační cesty zvuku procházející přes hřbet hrany, kdy každá tato propagační cesta má svou vlastní funkci směrovosti.

$$p_{\text{difr}}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} q \left[t - \frac{m(z) + l(z)}{c} \right] \frac{D_{\text{dir}}[\alpha(z), \gamma(z), \theta_S, \theta_R]}{m(z)l(z)} d\tau, \quad (6.5)$$

kde D_{dir} je funkce směrovosti, která je definovaná vztahem

$$D_{\text{dir}}[\alpha(z), \gamma(z), \theta_S, \theta_R] = -\frac{\nu\beta[\alpha(z), \gamma(z), \theta_S, \theta_R]}{4\pi}, \quad (6.6)$$

která v závislosti na jejích parametrech spolu se součinem vzdáleností $m(z)l(z)$ v rovnici (6.5) udává míru útlumu amplitudy zdrojového signálu. Pro konečnou hranu by stačilo do mezí integrálu v rovnici (6.5) dosadit mezní body hrany.

V článku [7], kde jsou všechny tyto vztahy odvozeny je také uvedeno, že pomocí funkce směrovosti a substituce souřadnic z za zpoždění $\tau = (m + l)/c$ se dá rovnice (6.1) zapsat jako

$$h_{\text{difr}}(\tau) = -\frac{\nu\beta[\alpha(\tau), \gamma(\tau), \theta_S, \theta_R]}{4\pi}. \quad (6.7)$$

Pro numerické výpočty se používá diskrétní časové pole. Dle článku [7] je hodnota impulzní odezvy difrakce $h_{\text{difr}}(n)$ v určitém diskrétním čase $\tau = n/f_s$, kde n je číslo vzorku a f_s je vzorkovací kmitočet, je dána vztahem

$$h_{\text{difr}}(n) = \int_{(n-0,5)/f_s}^{(n+0,5)/f_s} h_{\text{difr}}(\tau) d\tau. \quad (6.8)$$

Úpravou předešlé rovnice využitím funkce směrovosti a substitucí časového segmentu $d\tau$ za odpovídající segment hrany dz je odvozen náhradní vztah

$$h_{\text{difr}}(n) = -\frac{\nu}{4\pi} \int_{z_{n1}}^{z_{n2}} \frac{\beta[\alpha(z), \gamma(z), \theta_S, \theta_R]}{m(z)l(z)} dz, \quad (6.9)$$

kde z_{n1} a z_{n2} jsou souřadnice osy z korespondující s $\tau = (n \pm 0, 5)/f_s$.

Pro jednoduché počítačové numerické výpočty může být hrana rozdělena na stejně velké díly o počtu i_{max} a pro každý díl hrany se aproximuje jeho příspěvek k celkové impulzní odezvě hrany dle vztahu

$$\Delta h_i \approx -\frac{\nu}{4\pi} \frac{\beta[\alpha(z_i), \gamma(z_i), \theta_S, \theta_R]}{m(z_i)l(z_i)} \Delta z_i, \quad (6.10)$$

kde z_i je prostřední bod dílu a Δz_i je délka celého dílu. Tento přírůstek by měl být přiřazen jednomu vzorku n nebo rozdělen mezi dva či více vzorků. Zpoždění způsobené cestou zvuku přes bod z_i se totiž nemusí přesně shodovat s body diskrétního časového pole, což se dá vyřešit efektivním zjednodušením. Pokud je dodržena podmínka $\Delta z < c/f_s$, přírůstek impulzní odezvy jednoho dílu se rozdělí mezi právě dva nejbližší vzorky n v inverzní závislosti na vzdálenosti mezi časem zpoždění a těmito body časového pole. Tato metoda ale způsobuje zkreslení na vysokých kmitočtech. [6] [7] [8]

Jelikož standardní ozvučnice-přepážka má určitou tloušťku je vhodné počítat se dvěma hranami, tzn se dvěma difrakcemi v cestě zvuku od zdroje k přijímači. Počet difrakcí v cestě zvuku od zdroje k přijímači určuje řád difrakce. Vztah pro výpočet přírůstku impulzní odezvy difrakce druhého řádu je

$$\Delta h_{ij} \approx -\frac{\nu_1 \nu_2}{32\pi^2} \frac{\beta[\alpha_1(z_i), \gamma_1(z_i, z_j), \theta_{S1}, \theta_{R1}] \cdot \beta[\alpha_2(z_i, z_j), \gamma_2(z_j), \theta_{S2}, \theta_{R2}] \cdot \Delta z_i \Delta z_j}{m_1(z_i) m_2(z_i, z_j) l_2(z_j)}, \quad (6.11)$$

kde z_i a z_j jsou z-souřadnice dvou dílů dvou hran a m_1 , m_2 a l_2 jsou tři části cesty šíření zvuku zdroj- z_i - z_j -přijímač. Druhá hrana je rozdělena na j_{max} dílů a v ideálním případě platí, že $\Delta z_i = \Delta z_j$ a $i_{\text{max}} = j_{\text{max}}$. Ostatní parametry jsou stejné jako v rovnici (6.10) a Δh_{ij} je přírůstek této cesty šíření zvuku. [6] [7]

Pro zefektivnění numerického výpočtu se dá funkce β zapsat v kompaktnějším tvaru než v rovnicích (6.3) a (6.4) pomocí zjednodušení

$$\cosh(\nu\eta) = \frac{1}{2} (M^\nu + M^{-\nu}), \quad (6.12)$$

kde $M = (y^2 - 1)^{1/2} + y$ a $y = [ml + z(z - z_R)]/r_S r_R$. Díky tomuto se pro každý díl hrany musí přepočítávat jen základní matematické výpočty. [7]

6.2 Difrakce vznikající na standardní ozvučnici - přepážce

Reproduktor namontovaný ve standardní ozvučnici-přepážce lze podle článku [6] vnímat jako dva zdroje zvuku vyzařující současně se stejnou amplitudou, ale opačnou fází. Vzhledem k tomu, že je standardní ozvučnice-přepážka otevřená ozvučnice, oba tyto zdroje způsobují difrakce zvuku na jejích hranách, které pak zkreslují kmitočtovou charakteristiku měřeného reproduktoru. Pomocí numerického modelu impulzní odezvy těchto difrakcí by se mělo toto zkreslení dát vykompenzovat.

Impulzní odezva difrakcí způsobených vyzařováním jedné strany reproduktoru se získá superpozicí vektorů impulzních odezev difrakcí na jednotlivých hranách. Tedy

$$h_p(n) = h_{ph}(n) + h_{pl}(n) + h_{pp}(n) + h_{ps}(n) \quad (6.13)$$

a

$$h_z(n) = h_{zh}(n) + h_{zl}(n) + h_{zp}(n) + h_{zs}(n), \quad (6.14)$$

kde první písmeno v dolním indexu označení impulzní odezvy značí zdroj zvuku (přední strana reproduktoru = p, zadní strana reproduktoru = z) a případně druhé písmeno dolního indexu značí konkrétní hranu standardní ozvučnice-přepážky při pohledu zepředu na ni (horní = h, levá = l, pravá = p, spodní = s).[6]

Vzhledem k tloušťce standardní ozvučnice přepážky je dle článku [6] vhodné pro modelování jednotlivých částí $h_z(n)$ použít vztah pro difrakce 2. řádu (6.11). Pro $h_p(n)$ se modelují pouze impulzní odezvy difrakcí 1. řádu dle vztahu (6.10), ale daly by se také modelovat impulzní odezvy difrakcí 2. řádu. V článku [8] je však popsáno, že tyto difrakce u větších ozvučnic není nutné brát v potaz. Vzhledem k rozměrům standardní ozvučnice-přepážky by tedy měly difrakce 2. řádu na $h_p(n)$ zanedbatelný vliv.

Dle Článku [6] má zdroj S na nekonečné přepážce ve vzdálenosti 1 m nezvlněnou kmitočtovou charakteristiku. Na standardní ozvučnici přepážce je poté charakteristika zkreslena pouze difrakcemi. Výsledný model impulzní odezvy standardní ozvučnice-přepážky je tedy získán vztahem

$$h_{\text{model}}(n) = h_{\text{zdroj}}(n) + h_{\text{p}}(n) - h_{\text{z}}(n), \quad (6.15)$$

kde znaménko $-$ u $h_{\text{z}}(n)$ symbolizuje opačnou fázi a $h_{\text{zdroj}}(n)$ je impulzní odezva zdroje. Dle článku [7] je popsána jako $h_{\text{zdroj}}(\tau) = \delta(\tau - R/c)/R$, kde R je vzdálenost zdroje S od zdroje R. Pro zjednodušení se pak v diskretním časovém poli nepočítá se zpožděním přímého zvuku, tedy $h_{\text{zdroj}}(n) = \delta[0]/R$ a i ostatní části modelu od tohoto odvíjejí své vzorkování.

Pomocí rychlé Fourierovy transformace je možné z $h_{\text{model}}(n)$ získat přenosovou funkci $H(\omega)$, která je následně použitelná pro kompenzaci zkreslení měření difrakcemi, neboli získání kompenzované kmitočtové odezvy

$$p_{\text{komp}}(\omega) = \frac{p_{\text{měř}}(\omega)}{H(\omega)}, \quad (6.16)$$

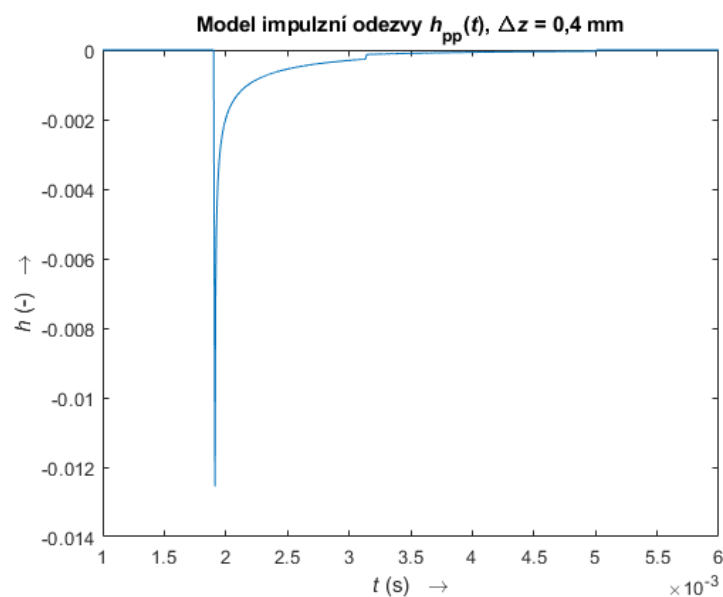
kde $p_{\text{měř}}(\omega)$ je měřená kmitočtová charakteristika reproduktoru na standardní ozvučnici-přepážce v 1 m. [6]

6.3 Softwarová kompenzace vlivů difrakcí

Na základě poznatků z částí 6.1 a 6.2 je možné kompenzovat jevy difrakcí vznikajících na standardní ozvučnici-přepážce pomocí počítačových výpočtů. V rámci této práce bylo pro kompenzaci zvoleno prostředí Matlab. Soubory použité ke kompenzaci jsou součástí elektronické přílohy. Stručný popis obsahu elektronické přílohy je pak v příloze D.V této části jsou zahrnuty pouze průběžné výstupy a konečné výsledky procesu kompenzace.

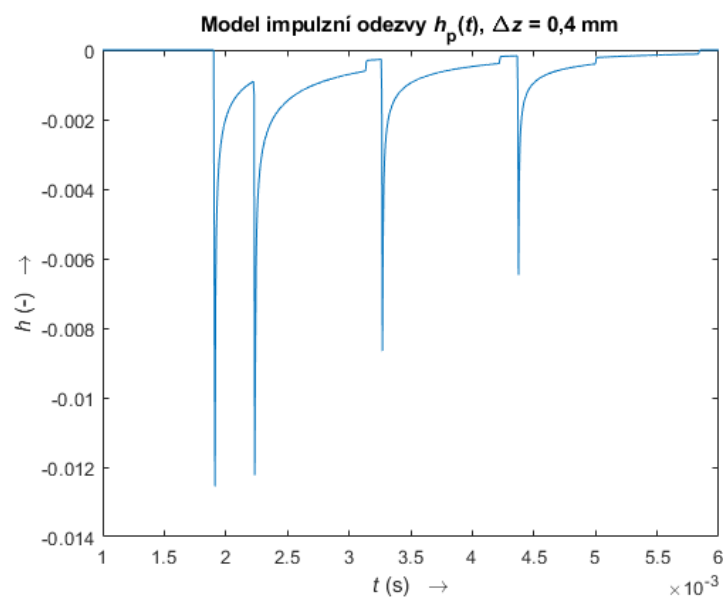
Modely impulzních odezev pro difrakce jednotlivých hran byly modelovány ve dvou rozlišeních $\Delta z = 0,4$ mm a $\Delta z = 1,5$ mm. Při rozlišení 1,5 mm může modelovaná impulzní odezva mít vzorkovací kmitočet 192 kHz, což je maximální a v konkrétním případě i použitý vzorkovací kmitočet pro měření kmitočtových charakteristik na analyzátoru APx 525. Při rozlišení 0,4 mm je možné použít vzorkovací kmitočet až čtyřikrát větší, tedy 768 kHz. Takto vysoký vzorkovací kmitočet je ovšem vhodný pouze pro přesnější zobrazení v časové oblasti, nikoliv k aplikaci v samotné kompenzaci. Při všech softwarových výpočtech se tedy pracovalo s $f_s = 192$ kHz

Na následujícím grafu je k vidění model impulzní odezvy $h_{\text{pp}}(n)$. Stejně jako ostatní impulzní odezvy v této části je zobrazen v časové doméně, kdy v čase $t = 0$ dorazí do přijímače přímý zvuk. Na odezvě lze pozorovat jak s rostoucí vzdáleností $m + l$ se blíží jeho amplituda k nule. Náhlý propad v čase cca 3 ms je dle článku [7] způsoben tím, že sekundární zdroje SS_n již nemají na druhé straně hrany párové zdroje $SS_{n'}$, jelikož hrana má konečné rozměry.



Obr. 6.3: Graf impulzní odezvy $h_{pp}(t)$.

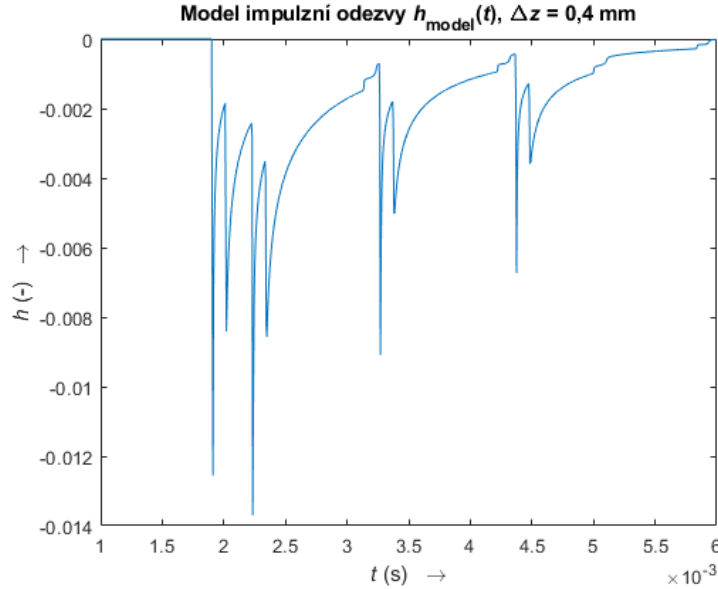
Superpozicí dle rovnice (6.13) je pak modelována impulzní odezva $h_p(n)$. Z jejího grafu lze rozeznat modely odezev pro jednotlivé hrany. To je způsobeno asymetrickým umístěním reproduktoru na standardní ozvučnici-přepážce.



Obr. 6.4: Graf impulzní odezvy $h_p(t)$.

Stejným postupem byla získána i impulzní odezva $h_z(n)$ a pomocí vztahu (6.15) pak model celkové impulzní odezvy standardní ozvučnice-přepážky potřebný pro kompenzaci. V následujícím grafu je tato impulzní odezva zobrazena se zaměřením

na část s difrakcemi . Celou impulzní odezvu nemá smysl zobrazovat, jelikož rozdíl mezi hodnotami $h_{\text{zdroj}}(n)$ a $h_p(n)$ nebo $h_z(n)$ je téměř stonásobný.



Obr. 6.5: Graf impulzní odezvy $h_{\text{model}}(t)$.

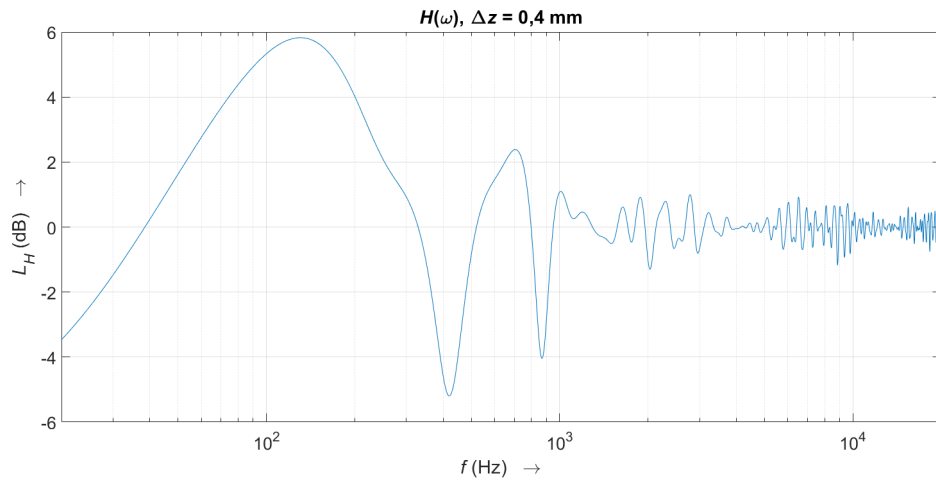
Jelikož byly všechny kmitočtové charakteristiky ze softwaru APx 500 exportovány jako závislost akustického tlaku na kmitočtu, je nakonec kompenzace provedena podle vztahu

$$L_{\text{komp}} = L_{\text{měř}} - L_{\text{H}}, \quad (6.17)$$

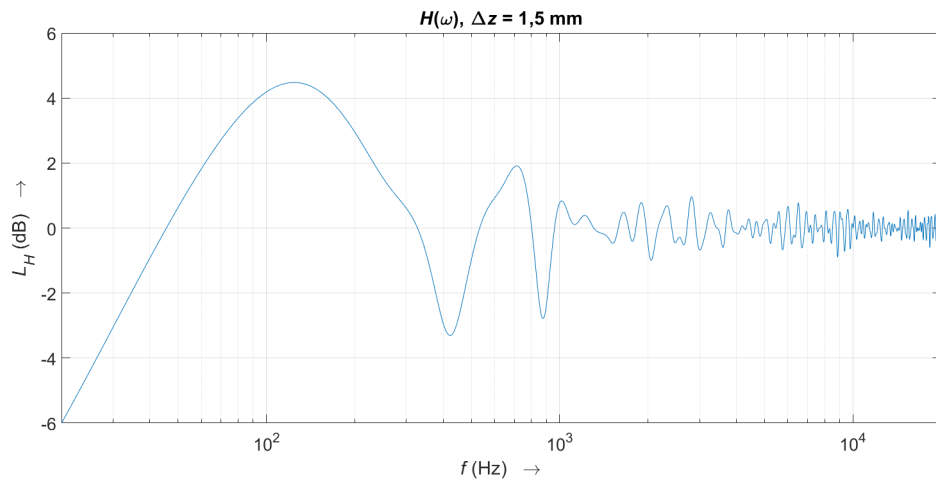
kde pro daný kmitočet je $L_{\text{měř}}$ hladina měřeného akustického tlaku, L_{komp} hladina akustického tlaku po kompenzaci a $L_{\text{H}} = 20 \cdot \log(|H(\omega)|)$.

Na následujících dvou grafech jsou zobrazeny výsledné modely $H(\omega)$ pro dvě různá rozlišení Δz . Obě dvě charakteristiky mají stejné průběhy, co se kmitočtů lokálních extrémů týče. Rozdíl způsobený různými Δz je v hladinách lokálních extrémů. Analýzou kmitočtových charakteristik jednotlivých propagačních cest zvuku bylo zjištěno, že kmitočtová charakteristika celého modelu $H(\omega)$ je dána interferencí koherentních vlnění. Opožděný signál každé propagační cesty zvuku difrakce způsobuje v kmitočtové charakteristice modelu $H(\omega)$ hřebenový filtr [9]. To odpovídá i teorii v části 6.1, jelikož signál sekundárního zdroje zvuku je signálem zdroje zvuku přímého se zpožděním τ a jinou amplitudou. Vzhledem k tomu, v jakém poměru jsou amplitudy signálů jednotlivých sekundárních zdrojů zvuku mezi sebou a v jakém vůči zdroji přímého zvuku, není možné z kmitočtové charakteristiky $H(\omega)$ identifikovat vlivy způsobené difrakcemi na jednotlivých hranách standardní ozvučnice-přepážky. Byla zkoumána i spojitost mezi vlnovými délkami lokálních

extrémů kmitočtové charakteristiky modelu $H(\omega)$ a vlnovými délkami korespondujícími s nejkratšími vzdálenostmi od zdroje zvuku k jednotlivým hranám. Žádná spojitost ovšem nalezena nebyla.



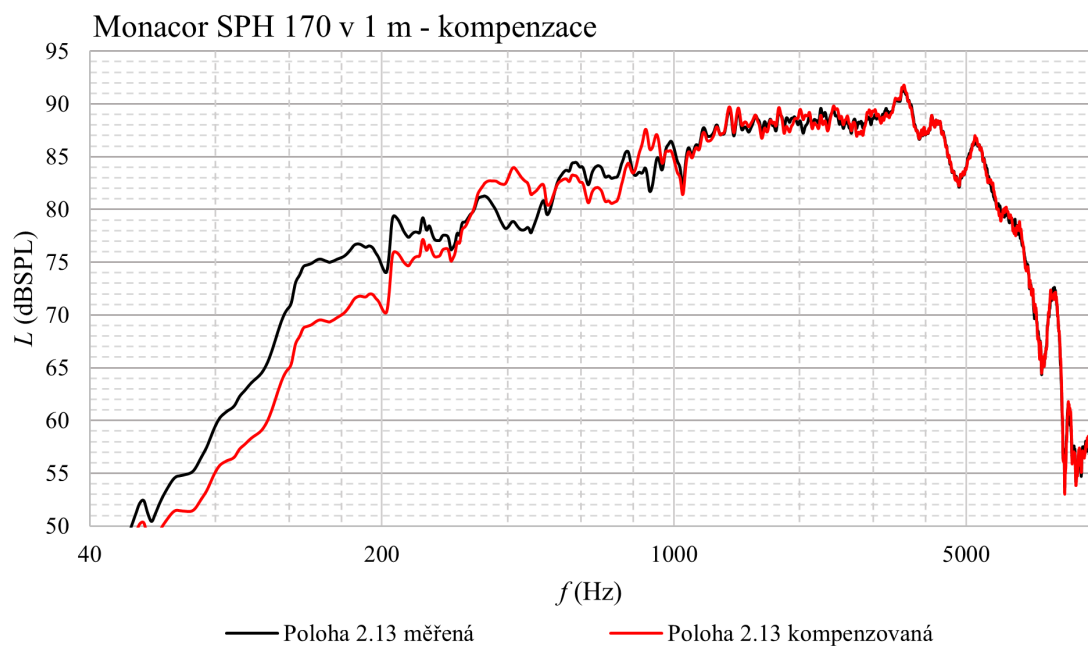
Obr. 6.6: Graf kmitočtové charakteristiky modelu $H(\omega)$ pro rozlišení $\Delta z = 0,4$ mm.



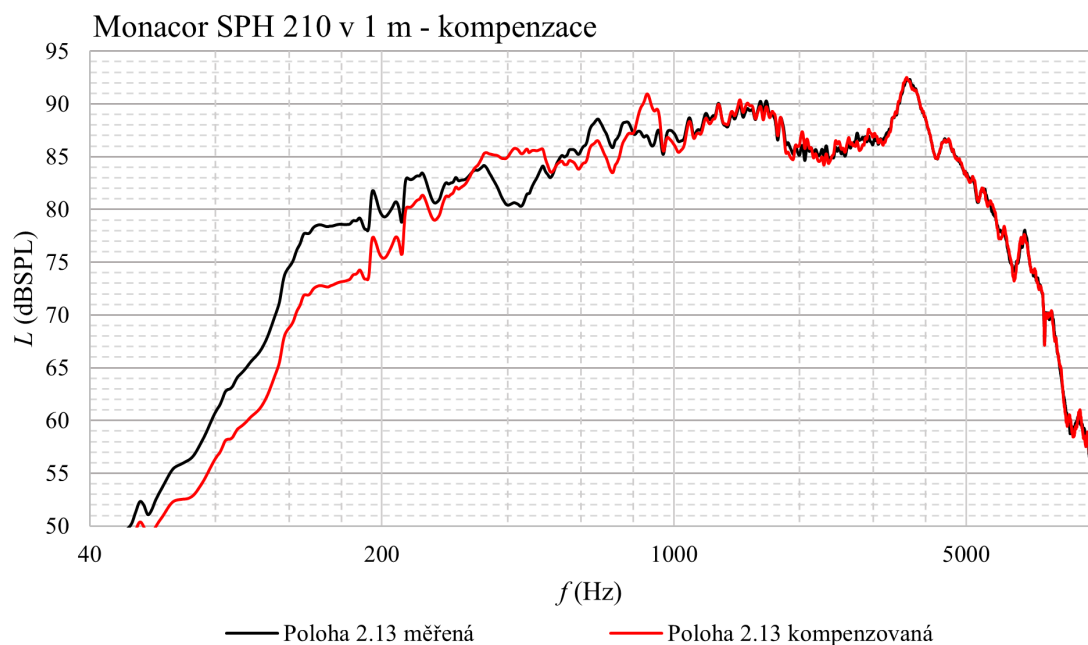
Obr. 6.7: Graf kmitočtové charakteristiky modelu $H(\omega)$ pro rozlišení $\Delta z = 0,5$ mm.

Pro kompenzaci měřených charakteristik byl nakonec zvolen model $H(\omega)$ s rozlišením $\Delta z = 0,4$ mm, jelikož by měl mít přesnější výsledky. Kompenzovány byly měřené kmitočtové charakteristiky obou testovaných reproduktorů, tedy SPH 170 a SPH 210. Ke kompenzaci byly zvoleny charakteristiky měřené na modulární standardní ozvučnici-přepážce bez podstavy a v poloze 2.13, viz A.2. Výsledky naznačují, že v určitých místech skutečně dochází kompenzaci. Mezi kmitočty 300 Hz a 800 Hz dochází k zmírnění zvlnění charakteristik. Mezi kmitočty 800 Hz a 1 kHz pak ale

dochází k poměrně drastickému zesílení. Dále až do kmitočtu 3 kHz dochází také k mírnějšímu zhoršení průběhů. Na kmitočtech vyšších jak 3 kHz postrádá kompenzace smysl, jelikož v charakteristikách už nejsou viditelné téměř žádné změny.

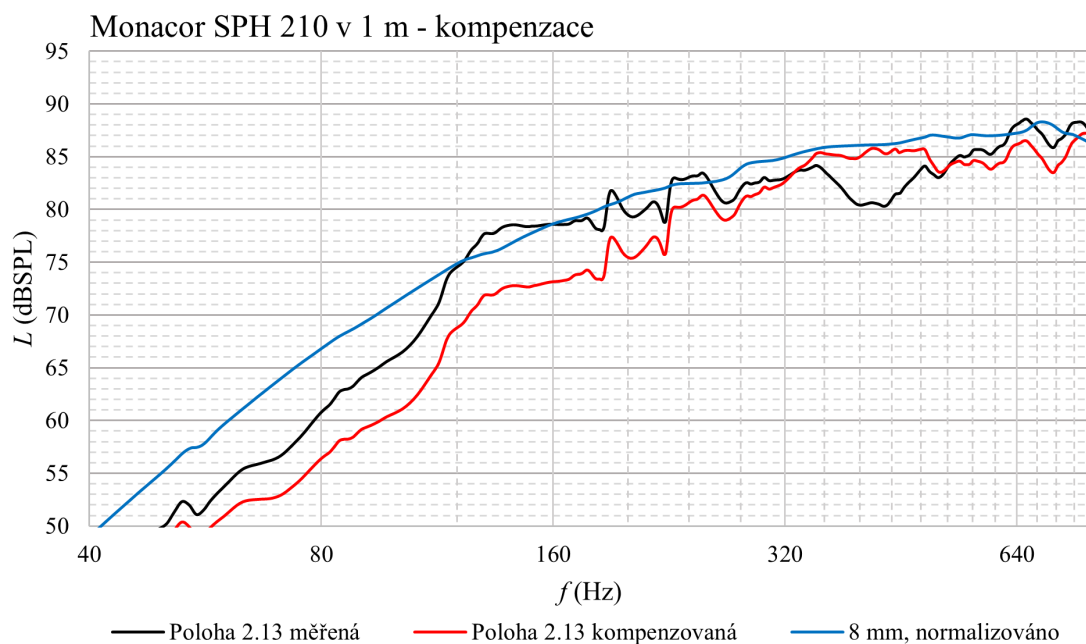


Obr. 6.8: Graf Kompenzace kmitočtové charakteristiky pro SPH 170.



Obr. 6.9: Graf Kompenzace kmitočtové charakteristiky pro SPH 210.

Na kmitočtech pod 300 Hz při kompenzaci dochází k opačnému efektu, než by se při kompenzaci, která by dle článku [6] měla měřenou charakteristiku na standardní ozvučnici-přepážce přiblížit charakteristice měřené na nekonečné přepážce. Charakteristika by se na nízkých kmitočtech měla po kompenzaci přibližovat k normalizovanému průběhu měřenému v blízkém poli. Jak je vidno na následujícím grafu, není tomu tak.



Obr. 6.10: Graf Kompenzace kmitočtové charakteristiky pro SPH 210 v porovnání s měřením v 8 mm.

Je potřeba ověřit, zda-li je vada v metodě kompenzace nebo v měřených kmitočtových charakteristikách. Muselo by se provést měření na standardní ozvučnici-přepážce ve volném poli minimálně 10 m nad zemí, jako je zmíněno v kapitole 2.2.1. Tím by se odstranily jakékoliv vady měření způsobené bezodrazovou komorou. Po kompenzací těchto měření by bylo možné dále rozhodovat o funkčnosti kompenzace.

Závěr

V rámci práce bylo provedeno seznámení s normou ČSN EN 60268-5 a především s teorií konstrukce standardní ozvučnice-přepážky a měření na nich proveditelných. Byla provedena sada testovacích měření za účelem otestování chování reproduktoru namontovaného na modulární standardní ozvučnici-přepážce při měření v bezodrazové komoře. Konkrétně bylo analyzováno zkreslení měření. Bylo zjištěno, že bezodrazová komora i modulární standardní ozvučnice-přepážka zkreslují měření reproduktoru.

Za účelem kompenzace těchto zkreslení byla hledána ideální poloha pro měření v bezodrazové komoře. Po nalezení této polohy v ní byla měřena modulární standardní ozvučnice-přepážka bez své podstavy, která taktéž zkresluje měření.

Dále bylo provedeno seznámení s teorií kompenzace zkreslení měření způsobeného difrakcemi vznikajícími na standardní ozvučnici-přepážce. Na základě teorie modelování difrakcí zvuku numerickými výpočty pomocí Biot-Tolstoy-Medwinovy metody a dalších poznatků z vědeckých článků byla v prostředí Matlab provedena softwarová kompenzace měření tohoto druhu zkreslení.

Výsledky softwarové kompenzace jsou diskutabilní. Správné fungování kompenzační metody nelze zcela potvrdit ani vyvrátit, kvůli scházejícímu ověřovacímu měření modulární standardní ozvučnice-přepážky ve volném poli. Toto měření totiž v době práce nebylo v daných podmínkách proveditelné. Ze získaných výsledků se ale dá soudit, že softwarová kompenzace pravděpodobně není použitelná v celém kmitočtovém rozsahu.

Literatura

- [1] ČSN EN 60268-5: *Elektroakustická zařízení - Část 5: Reproduktory. Česká technická norma*. Praha: Český normalizační institut, únor 2004.
- [2] SVOBODA, L. a ŠTEFAN M.: *Reproduktory a reproduktorové soustavy. 2. vyd.* Praha: SNTL, 1976, 325 s.
- [3] TOMAN, Kamil: *Reproduktory a reprosoustavy. Díl 1*. Orlová: Kamil Toman, 2003, 212 s.
- [4] *AES2-1984 (r2003): AES Recommended Practice Specification of Loudspeaker Components Used in Professional Audio and Sound Reinforcement* New York City: Audio Engineering Society, 1984
- [5] STRUCK, Ch. a S. TEMME. Simulated Free Field Measurements. *J. Audio Eng. Soc.* 1994, **42**(6), 467-482.
- [6] LE, Yi, Yong SHEN a Jie XIA. A Diffractive Study on the Relation between Finite Baffle and Loudspeaker Measurement. *J. Audio Eng. Soc.* 2011, **59**(12), 944-952.
- [7] SVENSSON, U. Peter, Roger I. FRED a John VANDERKOOY. An analytic secondary source model of edge diffraction impulse responses. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1999, **106**(5), 2331-2344. ISSN 0001-4966. Dostupné z: doi:10.1121/1.428071
- [8] VANDERKOOY, John. A Simple Theory of Cabinet Edge Diffraction. *J. Audio Eng. Soc.* 1991, **39**(12), 923-933.
- [9] Comb filter. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2022 [cit. 2022-05-30]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Comb_filter

Seznam symbolů a zkratek

A	Obecný rozměr v náčrtcích.
$A(t)$	Objemové zrychlení.
AES	Audio Engineering Society
B	Obecný rozměr v náčrtcích.
C	Obecný rozměr v náčrtcích.
c	Rychlost zvuku.
ČSN	Chráněné označení českých technických norem.
D	Obecný rozměr v náčrtcích.
D_{dir}	Funkce direktivity
E	Obecný rozměr v náčrtcích.
F	Obecný rozměr v náčrtcích.
f_{max}	Maximální kmitočet pro měření reproduktoru v blízkém poli.
f_s	Vzorkovací kmitočet.
$H(\omega)$	Kmitočtová charakteristika výsledného modelu.
h_{difr}	Obecný model impulzní odezvy difrakce.
$H(\tau - \tau_0)$	Heavysidova funkce.
Δh_i	Přírůstek impulzní odezvy hrany.
Δh_{ij}	Přírůstek impulzní odezvy dvou hran.
h_{model}	Impulzní odezva celkového modelu.
h_p	Impulzní odezva difrakcí z přední strany.
h_{ph}	Impulzní odezva difrakcí z přední strany, horní hrana.
h_{pl}	Impulzní odezva difrakcí z přední strany, levá hrana.
h_{pp}	Impulzní odezva difrakcí z přední strany, pravá hrana.
h_{pz}	Impulzní odezva difrakcí z přední strany, zadní hrana.

h_z	Impulzní odezva difrakcí ze zadní strany.
h_{zh}	Impulzní odezva difrakcí ze zadní strany, horní hrana.
h_{zl}	Impulzní odezva difrakcí ze zadní strany, levá hrana.
h_{zp}	Impulzní odezva difrakcí ze zadní strany, pravá hrana.
h_{zz}	Impulzní odezva difrakcí ze zadní strany, zadní hrana.
h_{zdroj}	Impulzní odezva přímého zvuku.
i	Číslo segmentu hrany.
$i_{\max}$	Počet segmentů hrany.
j	Číslo segmentu hrany.
$j_{\max}$	Počet segmentů hrany.
l	Vzdálenost trajektorie zvuku.
L_1	Hladina akustického tlaku v poloměr kulové vlny 1.
L_2	Hladina akustického tlaku v poloměr kulové vlny 2.
L_H	Hladina modelu vztažená k přímému zvuku kmitočtové charakteristiky.
L_{komp}	Hladina akustického tlaku kompenzované charakteristiky.
$L_{\text{měř}}$	Hladina akustického tlaku měřené charakteristiky.
l_l	Vzdálenost trajektorie zvuku.
l_u	Vzdálenost trajektorie zvuku.
l_1	Vzdálenost trajektorie zvuku od hrany 2 k přijímači.
M	Substituční veličina.
m	Vzdálenost trajektorie zvuku.
m_l	Vzdálenost trajektorie zvuku.
m_u	Vzdálenost trajektorie zvuku.
m_1	Vzdálenost trajektorie zvuku od zdroje ke hraně 1.

m_2	Vzdálenost trajektorie zvuku od hrany 1 ke hraně 2.
n	Číslo vzorku.
p_{difr}	Obecný model akustického tlaku difrakce.
$p_{\text{komp}}(\omega)$	Kompenzovaná kmitočtová charakteristika.
$p_{\text{měř}}(\omega)$	Měřená kmitočtová charakteristika.
Q	Bod sekundárního zdroje 0.
$q(t)$	Zdrojový signál zvuku.
R	Bodový přijímač zvuku.
r_1	Poloměr kulové vlny 1.
r_2	Poloměr kulové vlny 2.
r_{ef}	Efektivní poloměr reproduktoru.
r_{r}	Poloměr válce od hrany k přijímači zvuku.
r_{s}	Poloměr válce od hrany ke zdroji zvuku.
S	Bodový zdroj zvuku.
SS_n	Sekundární zdroj n.
SS_{n'}	Sekundární zdroj n'.
SS₀	Sekundární zdroj 0.
y	Substituční veličina.
z	Vzdálenost na ose z.
z_i	Vzdálenost bodu i na ose z.
Δz	Velikost segmentu hrany.
Δz_i	Velikost segmentu hrany 1.
Δz_j	Velikost segmentu hrany 2.
z_j	Vzdálenost bodu j na ose z.
z_{R}	Vzdálenost zdroje a přijímače na ose z.

α	Úhel trajektorie zvuku.
α_1	Úhel trajektorie zvuku k hraně 1.
α_2	Úhel trajektorie zvuku k hraně 2.
β	Funkce beta.
γ	Úhel trajektorie zvuku.
γ_1	Úhel trajektorie zvuku k hraně 1.
γ_2	Úhel trajektorie zvuku k hraně 2.
$\delta(\tau)$	Diracův impuls.
η	Část funkce beta.
θ_R	Úhel mezi hranou a přijímačem zvuku.
θ_{R1}	Úhel mezi hranou a přijímačem zvuku 1.
θ_{R2}	Úhel mezi hranou a přijímačem zvuku 2.
θ_S	Úhel mezi hranou a zdrojem zvuku.
θ_{S1}	Úhel mezi hranou a zdrojem zvuku 1.
θ_{S2}	Úhel mezi hranou a zdrojem zvuku 2.
θ_W	Úhel hrany.
κ	Úhel pootočení ozvučnice.
ν	Index hrany.
ν_1	Index hrany 1.
ν_2	Index hrany 2.
ρ_0	Hustota kapaliny.
τ_0	Nejkratší doba cesty zvuku.

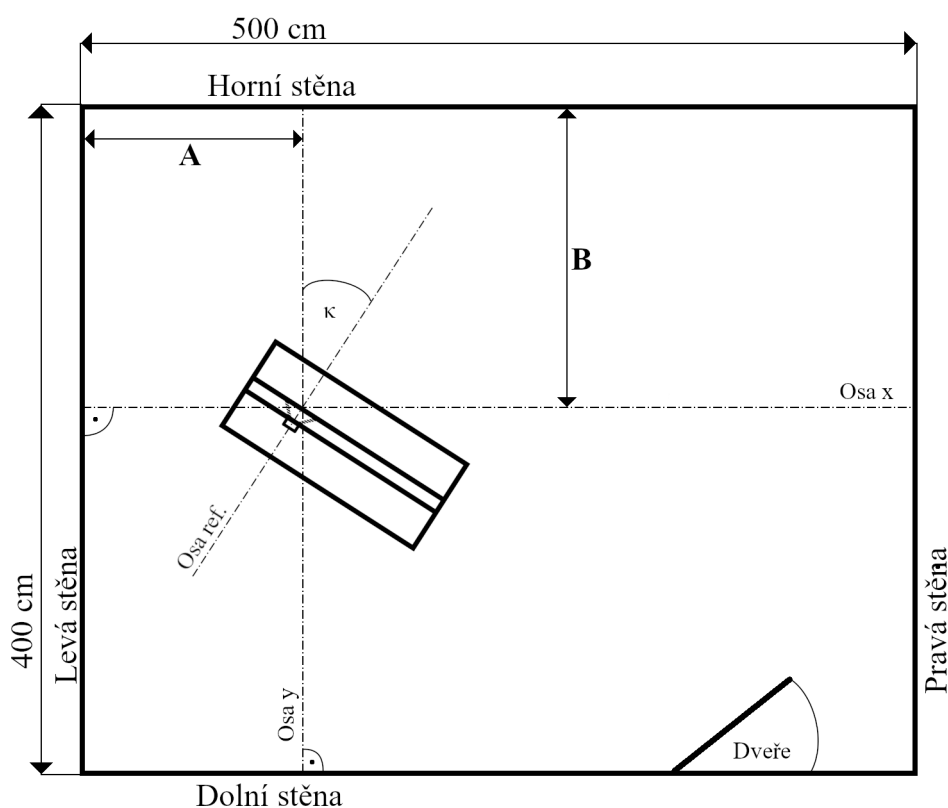
Seznam příloh

A	Definice měřících poloh	51
A.1	Měřící poloha - konfigurace 1	51
A.2	Měřící polohy v konfiguracích 2 a 3	52
B	Různé polohy měření ve vzdálenosti 1 m	54
C	Tlumení odrazů zvuku od podstavy	56
D	Obsah elektronické přílohy	58

A Definice měřících poloh

Měřící polohy v modulární standardní ozvučnice-přepážky v bezodrazové komoře jsou popsány pomocí náčrtků a tabulek v následujících podkapitolách. Náčrtky bezodrazové komory uvažují ve svých rozměrech jen prostor, ve kterém se lze v komoře volně pohybovat. Do rozměrů komory není tedy započítán tlumící materiál na stěnách.

A.1 Měřící poloha - konfigurace 1



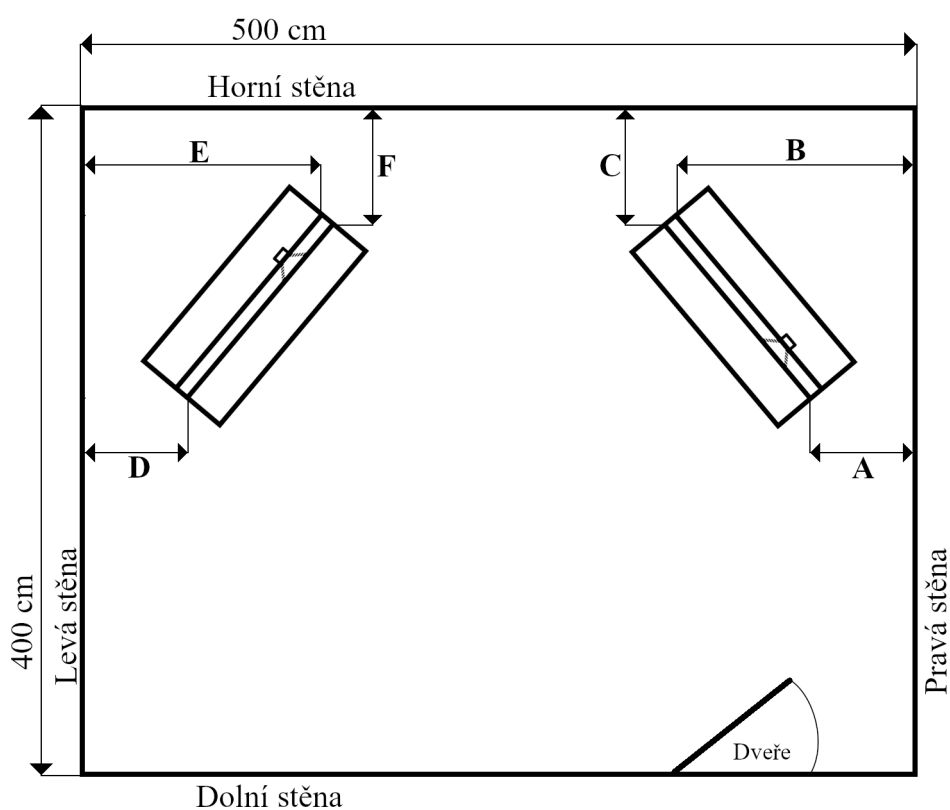
Obr. A.1: Náčrtek pro definování konfigurace 1 měřící polohy v bezodrazové komoře.

Podmínkou této konfigurace je průsečík osy x, osy y a referenční osy reproduktoru náležící rovině přední stěny standardní ozvučnice-přepážky.

Označení polohy	A (cm)	B (cm)	κ (°)
Poloha 1.1	213	180	0
Poloha 1.2	213	180	45
Poloha 1.3	213	180	90
Poloha 1.4	348	180	0

Tab. A.1: Tabulka měřících poloh v konfiguraci 1

A.2 Měřící polohy v konfiguracích 2 a 3



Obr. A.2: Náčrtek pro definování měřících poloh v konfiguracích 2 a 3 v bezodrazové komoře.

Označení polohy	A (cm)	B (cm)	C (cm)
Poloha 2.1	70	66	26
Poloha 2.2	57	53	26
Poloha 2.3	57	53	45
Poloha 2.4	57	53	14
Poloha 2.5	37	33	14
Poloha 2.6	37	33	26
Poloha 2.7	37	33	45
Poloha 2.8	24	87	54
Poloha 2.9	31	111	48
Poloha 2.10	70	66	44
Poloha 2.11	70	66	11
Poloha 2.12	52	106	22
Poloha 2.13	34	106	23
Poloha 2.14	14	110	27
Poloha 2.15	34	146	32

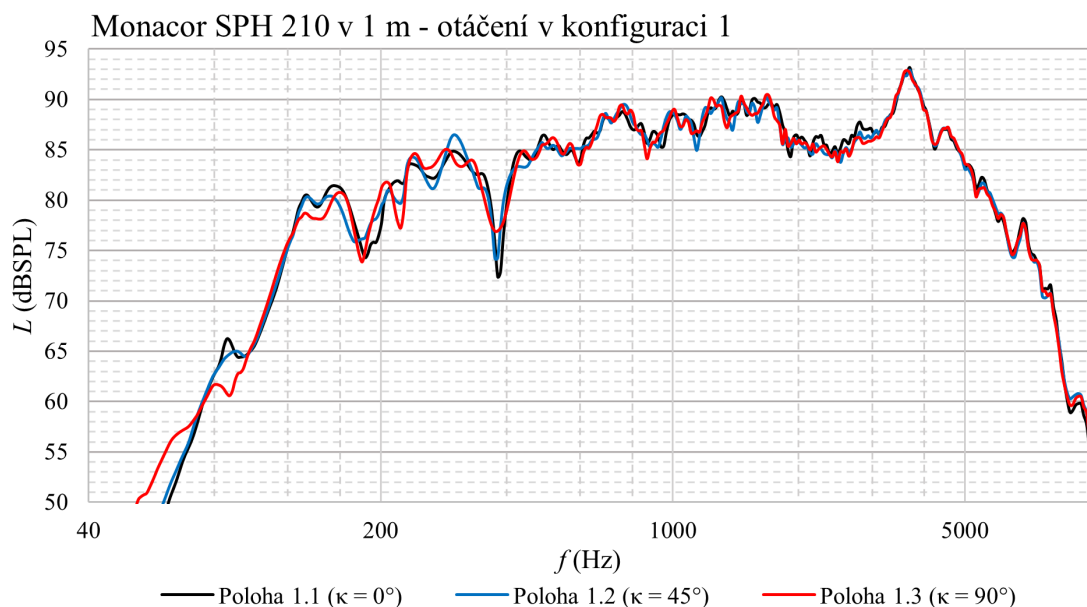
Tab. A.2: Tabulka měřících poloh v konfiguraci 2

Označení polohy	D (cm)	E (cm)	F (cm)
Poloha 3.1	71	67	24
Poloha 3.2	23	19	51

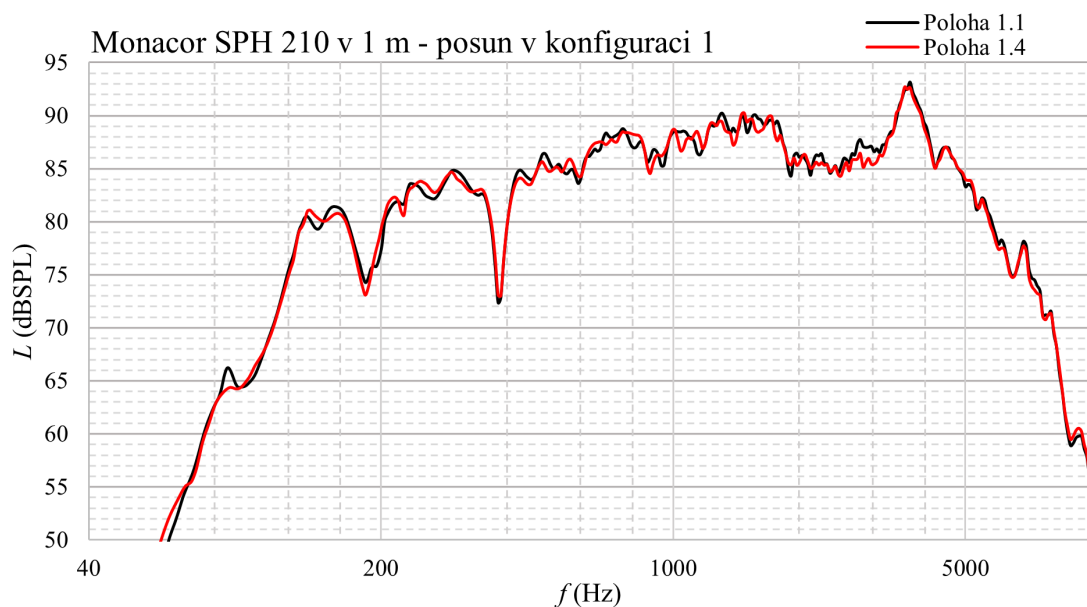
Tab. A.3: Tabulka měřících poloh v konfiguraci 3

B Různé polohy měření ve vzdálenosti 1 m

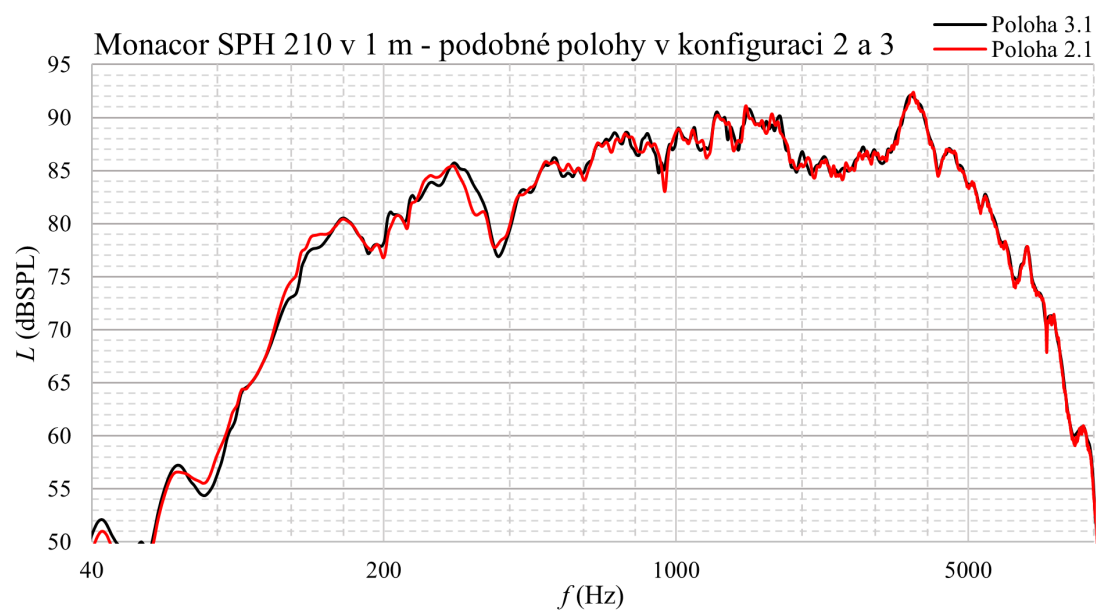
Všechny měřicí polohy, ve kterých byly měřeny kmitočtové charakteristiky v této příloze, jsou definovány v příloze A.



Obr. B.1: Graf kmitočtových charakteristik reproduktoru SPH 210 při měření ve vzdálenosti 1 m a různých otočeních přepážky v konfiguraci 1.



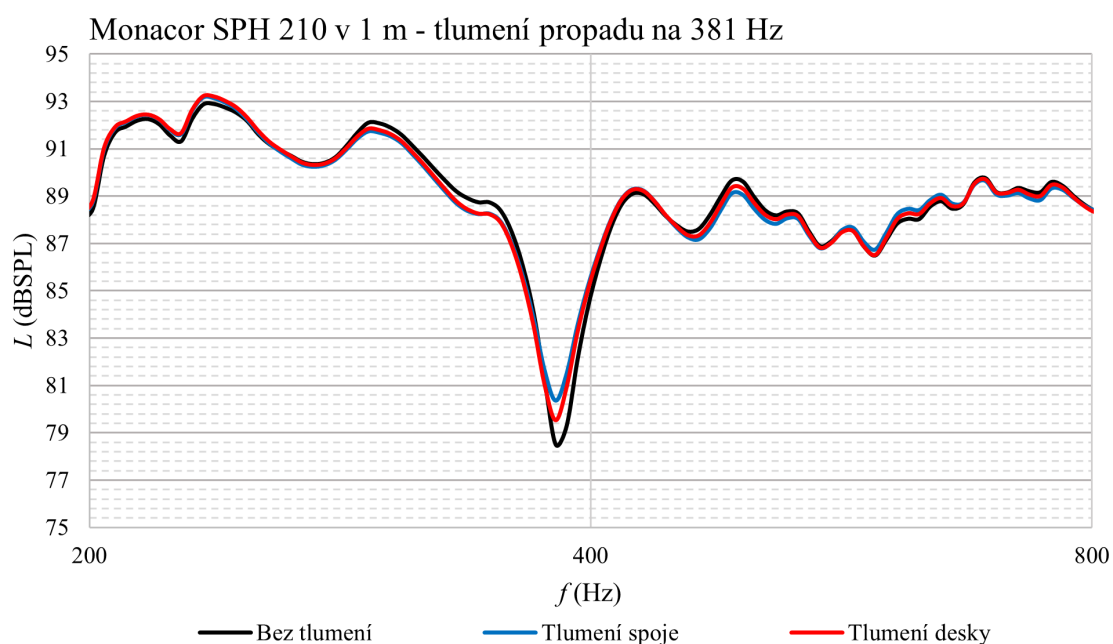
Obr. B.2: Graf kmitočtových charakteristik reproduktoru SPH 210 při měření ve vzdálenosti 1 m pro různý posun přepážky v konfiguraci 1.



Obr. B.3: Graf kmitočtových charakteristik reproduktoru SPH 210 při měření ve vzdálenosti 1 m pro podobné polohy v konfiguracích 2 a 3.

C Tlumení odrazů zvuku od podstavy

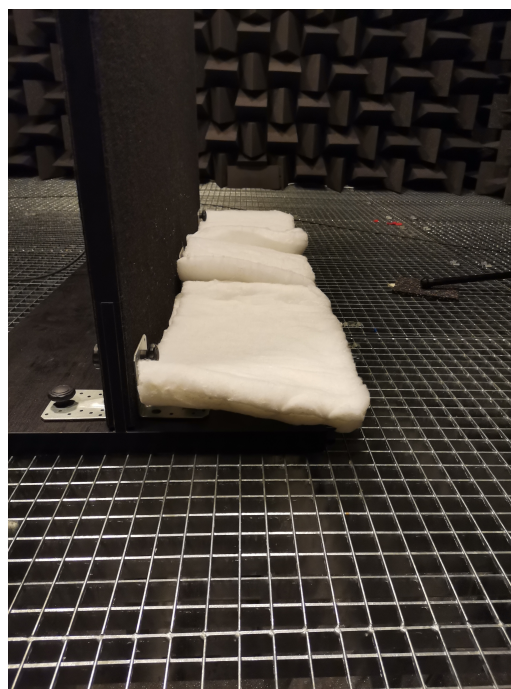
Na následujícím grafu jsou kmitočtové charakteristiky měřené v poloze 1.1 (viz A.1) s použitím tlumícího materiálu MDM-4 a bez. Graf je zaměřen na kmitočet 381 Hz, kde se nachází propad v charakteristikách způsobený podstavou. Vzhledem k malým rozdílům mezi jednotlivými charakteristikami je upravený rozsah osy y. Jak jsou jednotlivé způsoby tlumení myšleny je k vidění na obrázku C.2. Všechny charakteristiky jsou bohužel na ose y posunuty, jelikož při měření byl špatně kalibrovaný mikrofón. Jsou tedy pouze pro porovnávací účely.



Obr. C.1: Graf kmitočtových charakteristik reproduktoru SPH 210 v 1 m při tlumení podstavy vatou MDM-4



(a)



(b)

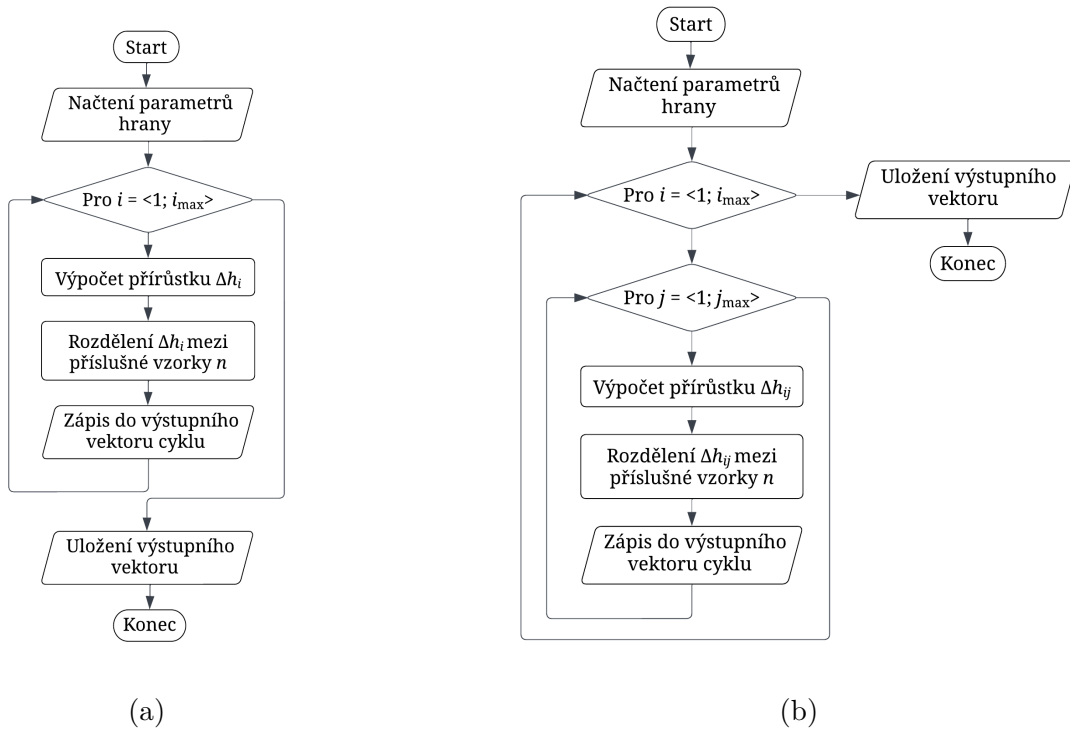
Obr. C.2: Vyzkoušené způsoby tlumení materiálem MDM-4: a) tlumení spoje, b) tlumení desky.

D Obsah elektronické přílohy

Softwarová kompenzace z části 6.3 byla provedena pomocí programu Matlab verze 2021b a byla aplikována na naměřených datech vyexportovaných ze softwaru APx500 verze 4.6. Elektronická příloha obsahuje soubory potřebné k této kompenzaci. Jedná se o funkce, skripty a jejich vstupy a výstupy (soubory s proměnnými vytvořenými v Matlabu nebo soubory měřených dat z APx500).

Matlab funkce, které příloha obsahuje jsou soubory `hi.m` a `hij.m`. Tyto funkce slouží k výpočtu hodnoty přírůstků Δh_i a Δh_{ij} pomocí vztahů (6.10) a (6.11) s využitím substituce (6.12). Kromě přírůstku ještě spočítají jeho zpoždění oproti přímému zvuku. Výstupem jsou tedy dvě hodnoty.

Modelování impulzních odezev $h_p(n)$ a $h_z(n)$ a jejich jednotlivých složek bylo provedeno pomocí Matlab skriptů `hiskript.m` a `hjskript.m`. Jejich názvy napovídají s jakou funkcí daný skript pracuje. Postup, jak modelují impulzní odezvy jednotlivých hran, je stručně popsán na následujících diagramech. Skripty také používají vztahy (6.13) a (6.14). Výsledné modely $h_p(n)$ a $h_z(n)$ jsou pak uloženy a následně zobrazeny v grafech v časové doméně.



Obr. D.1: Návrh algoritmu pro výpočet modelu impulzní odezvy difrakcí jedné hrany způsobenými: a) přední stranou reproduktoru, b) zadní stranou reproduktoru.

Výpočet modelů $h_{\text{model}}(n)$ pomocí vztahu (6.15) a $H(\omega)$ pomocí FFT je realizován ve skriptech `vypocet_modelu... .m`. Místo teček jsou v názvu souboru konkrétní hodnoty f_s a Δz . Výsledné modely jsou pak uloženy a zobrazeny v grafech.

Kompenzaci měřených charakteristik provádí skripty `kompenzace_... .m`. Místo teček jsou v názvu souboru bližší specifikace, co daný skript a kompenzuje a jaké je rozlišení modelu Δz . Zobrazeny jsou grafy modelů $h_{\text{model}}(n)$ a $H(\omega)$ a grafy srovnání měřených a kompenzovaných kmitočtových charakteristik. Kompenzované charakteristiky jsou uloženy do příslušných `.xls` souborů pro další srovnávací účely.

Kde se jednotlivé skripty v elektronické příloze nachází je zobrazeno ve výpisu adresářové struktury níže. Výpis není kvůli množství souborů kompletní. Neobsahuje vstupní a výstupní soubory pro zmíněné skripty.

```

/.....kořenový adresář přiloženého archivu
├── kompenzace
│   ├── kompenzace_ruzna_deltaZ_sph210.m
│   ├── kompenzace_sph210_sph170_fs192k_deltaZ_0_4mm.m
│   └── ...
├── model celkove IR
│   ├── vypocet_modelu_fs192kHz__deltaZ_0_4mm.m
│   ├── vypocet_modelu_fs192kHz__deltaZ_1_5mm.m
│   └── ...
├── model difrakci zepredu deltaZ 0_4mm
│   ├── hi.m
│   ├── hiskript.m
│   └── ...
├── model difrakci zepredu deltaZ 1_5mm
│   ├── hi.m
│   ├── hiskript.m
│   └── ...
├── model difrakci zezadu deltaZ 0_4mm
│   ├── hij.m
│   ├── hijskript.m
│   └── ...
└── model difrakci zezadu deltaZ 1_5mm
    ├── hij.m
    ├── hijskript.m
    └── ...

```